



**Universidade do Minho**

Escola de Engenharia

Sérgio Filipe Mendes Ferreira Martins

**Estruturas de Madeira – Inspeção e  
Diagnóstico. Aplicação em Caso de Estudo**

Setembro de 2009



**Universidade do Minho**

Escola de Engenharia

Sérgio Filipe Mendes Ferreira Martins

## **Estruturas de Madeira – Inspeção e Diagnóstico. Aplicação em Caso de Estudo**

Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil  
Área de Especialização Materiais, Reabilitação e  
Sustentabilidade da Construção

Trabalho efectuado sob a orientação do  
**Professor Doutor Rui Miguel Jesus Rodrigues Ferreira**  
**Professor Doutor Artur Jorge de Oliveira Feio**

Setembro de 2009



## **AGRADECIMENTOS**

É com muito apreço que agradeço aos meus orientadores, Prof. Artur Feio e Prof. Rui Miguel Ferreira, por todo o apoio, conhecimento e tempo que me concederam. Do fundo do coração expresso um "muito obrigado" pois sei que lhes roubei muito tempo, tempo esse que não me pertencia.

Agradeço à Daniela todo o amor e apoio que me deu, e tudo o que disser será pouco para retribuir o seu contributo, ajudou-me muito a nível emocional, e ajudou-me muito ao longo da redacção deste trabalho. É um dos pilares fundamentais da minha vida e esta dissertação devo-a grande parte a ela.

Agradeço aos meus pais e à minha irmã, que sempre me proporcionaram o melhor para mim, e que partilharam das minhas angústias e obstáculos, sem eles não seria o que sou e sem eles este trabalho não se teria concretizado. À minha avó, aos meus tios e aos pais da Daniela também agradeço toda a colaboração e motivação que me deram.

Pretendo manifestar a minha gratidão para com o Sr. Monteiro e a Sr.<sup>a</sup> Célia da Plansedra, ao me terem apoiado e cedido as tardes de sexta-feira durante todo Mestrado.

Quero agradecer à Arq.<sup>a</sup> Isabel Sereno da Direcção Regional de Cultura do Norte por me ter autorizado a utilizar o Mosteiro de Santa Maria de Pombeiro e, por me ter fornecido elementos acerca da sua história. Agradeço ao Arq.<sup>o</sup> Carlos Fonseca e João Carlos da mesma instituição por terem ajudado a tornar possível a realização do caso de estudo num monumento nacional.

Agradeço aos meus amigos Bruno, Hugo, Joana, Pedro, Ricardo, Rosana, Sofia, e muitos outros, que me ajudaram ao longo da dissertação e me deram todo o apoio, sem eles teria sido mais difícil. Ao meu amigo Arq.<sup>o</sup> Bruno Coutinho a minha mais profunda admiração e gratidão por me ter executado as ilustrações da metodologia prática.

Por último, queria agradecer ao Sr. Matos do Laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho o apoio na elaboração dos ensaios dos provetes no laboratório.



## RESUMO

Actualmente, existe um novo impulso na reabilitação de edifícios antigos nos centros urbanos, edifícios estes que na sua maioria são constituídos por pavimentos e coberturas em madeira. Apesar da madeira ser um material de construção tradicional com utilização milenar, é um material que continua a ser desconhecido dos técnicos e intervenientes no processo de construção, muito por culpa da ausência deste tema nos planos curriculares dos cursos de Engenharia Civil.

Nesta perspectiva surge a necessidade de munir os técnicos e demais intervenientes no processo de reabilitação, de estruturas de madeira ou demais materiais, de ferramentas de diagnóstico e análise, que lhes permita tomar a opção de intervir nos edifícios causando o mínimo impacto e mantendo sempre que possível a traça do edifício.

Assim, o presente trabalho apresenta um levantamento de alguns agentes patológicos e sua actividade/danos nos elementos de madeira, e uma metodologia de inspecção e diagnóstico e análise visual com recurso a ensaios não destrutivos (NDT ou END), nomeadamente Pilodyn, Resistógrafo e ultra-sons. Por fim, é apresentado um caso de estudo em que a metodologia é aplicada: inspecção e diagnóstico do corredor das celas no Mosteiro de Santa Maria de Pombeiro em Felgueiras. Foram inspeccionadas e diagnosticadas 17 vigas de carvalho da estrutura do pavimento do corredor das celas. Paralelamente, e com o objectivo de se estabelecerem valores orientativos de madeira sã para comparação com os resultados obtidos pelos ensaios não destrutivos, utilizaram-se 5 provetes de madeira de carvalho, ensaiados em laboratório.

Os resultados obtidos sugerem que a inspecção visual é um bom método de inspecção, sobretudo quando conjugada com o Pilodyn e com o Resistógrafo. A utilização de ultra-sons revelou uma grande dispersão de resultados, não sendo por isso apropriados para aplicações práticas em elementos de madeira irregulares, ou de difícil acesso.

A adopção de uma metodologia de inspecção e diagnóstico assente na inspecção visual em conjunto com os NDT representa o primeiro passo no processo de reabilitação de estruturas de madeira. No entanto, dada a dispersão de resultados obtida, associada à elevada heterogeneidade intra e inter espécie de madeira, apenas pode-se formalizar uma avaliação qualitativa do estado geral do madeiramento presente nos edifícios a intervir.



## **ABSTRACT**

Nowadays, we witness a revival in the rehabilitation of old constructions in urban centres. The majority of these constructions are built with wooden floors and roofs. Although wood is a traditional and immemorial construction material, it is still relatively unknown to the engineers and technician involved in the construction process. This is due to the fact that in recent history concrete has been the dominant building material and, in part, to the lack of adequate curricular in Civil Engineering courses in the past.

Therefore, the need arises to adequately prepare engineers and technician and all those involved in the rehabilitation of wooden constructions, with appropriate means of diagnostic and analysis that will influence the rehabilitation intervention decision making process with minimum impact and maintaining as much as possible the originality of the building.

In this way, the current research presents a compilation of some of the pathological agents and their activity/damage in wooden elements, as well as a methodology for inspection, diagnosis and visual analysis based on non destructive testing (NDT), namely with the Pilodyn, the Resistograph and ultra-sound. Following, a case study is presented in which the methodology is applied: the inspection and diagnosis of the cell corridor in the Monastery of Santa Maria de Pombeiro, in Felgueiras. 17 oak beams of the structural support of the floors of the corridor were inspected and diagnosed. Additionally, with the objective of establishing comparative values of healthy oak wood, the same NDT procedures were carried out on 5 wooden specimens in the laboratory.

The results of the study suggest that visual inspection is a good method for the inspection of wooden structures, especially when in conjunction with the Pilodyn and the Resistograph. The use of ultra-sound was considered inappropriate for practical applications as it resulted in a large scattering of the results due to the irregularity of the wooden beams and the difficulty in accessing the beam for testing.

The first step in the process of rehabilitation of wooden structures is the use of an inspection and diagnosis methodology based on visual inspection and NDT. However, given that the results obtained have a large scatter due to the intra and inter heterogeneity of the wood, only a qualitative assessment of overall state of the wooden elements is presented.



## ÍNDICE

<b>Capítulo 1 - Introdução</b>	1
<b>1.1 Considerações Gerais</b>	1
<b>1.2 Objectivos</b>	2
<b>1.3 Organização da Dissertação</b>	3
<b>Capítulo 2 - Breve História da Construção em Madeira</b>	5
<b>2.1 Das Primeiras Utilizações à Actualidade</b>	5
<b>2.2 Referências Bibliográficas - Capítulo 2</b>	20
<b>Capítulo 3 - A Constituição da Madeira</b>	23
<b>3.1 Definição de Madeira</b>	23
<b>3.2 As Componentes de Uma Árvore</b>	24
<b>3.3 A Estrutura do Tronco</b>	24
3.3.1 Crescimento do Lenho	25
3.3.2 Constituintes do Lenho	26
<b>3.4 As Primeiras Árvores e a sua Classificação Botânica</b>	27
3.4.1 A Evolução das Plantas	27
3.4.2 Gimnospérmicas Versus Angiospérmicas	27
3.4.2.1 <i>Gimnospérmicas</i>	27
3.4.2.2 <i>Angiospérmicas</i>	29
<b>3.5 Os Anéis de Crescimento</b>	31
<b>3.6 Estrutura Microscópica da Madeira</b>	32
3.6.1 Estrutura Microscópica de Resinosas	33
3.6.2 Estrutura Microscópica de Folhosas	35
<b>3.7 Estrutura Sub-Microscópica da Madeira</b>	38
<b>3.8 Caracterização da Madeira Segundo os Planos Radial e Tangencial</b>	40
3.8.1 Grão da Madeira	41
3.8.2 Textura da Madeira	41
3.8.3 Fio da Madeira	41
3.8.4 Veio da Madeira	41
<b>3.9 Composição Química</b>	42
<b>3.10 As Propriedades e Características da Madeira</b>	44
3.10.1 Propriedades Físicas	44
3.10.1.1 A Água na Sua Constituição	44
3.10.1.2 Teor de Humidade	44
3.10.1.3 Higroscopicidade	46
3.10.1.4 Retracção e Dilatação	48
3.10.1.5 Densidade e Densidade relativa	50

3.10.1.6 Durabilidade	52
3.10.1.7 Propriedades Térmicas	53
3.10.1.8 Propriedades Acústicas	54
3.10.1.9 Propriedades Eléctricas	55
3.10.1.10 Resistência ao fogo	55
3.10.2 Propriedades Mecânicas	57
3.10.2.1 Compressão Paralela às Fibras	58
3.10.2.2 Compressão Perpendicular às Fibras	58
3.10.2.3 Flexão Estática	59
3.10.2.4 Tracção Paralela às Fibras	59
3.10.2.5 Tracção Perpendicular às Fibras	60
3.10.2.6 Módulo de Elasticidade	60
3.10.2.7 Corte	61
3.10.2.8 Dureza	61
3.10.2.9 Factores que Influenciam as Propriedades Mecânicas	62
<b>3.11 Bibliografia - Capítulo 3</b>	65
<b>Capítulo 4 - Classificação e Requisitos da Madeira</b>	67
4.1 Generalidades	67
4.2 Classificação da Madeira	67
4.2.1 Tipos de Classificação	67
4.2.2 Normas Relacionadas	68
4.2.3 Classes de Resistência	70
4.3 Durabilidade e Tratabilidade	70
4.4 Classes de Risco	73
4.5 Bibliografia - Capítulo 4	77
<b>Capítulo 5 - Deterioração da Madeira</b>	79
5.1 Generalidades	79
5.2 Agentes Abióticos	79
5.2.1 A Água	79
5.2.2 A Radiação Solar	80
5.2.3 O Fogo	83
5.2.4 Os Compostos Químicos	86
5.3 Agentes Bióticos	88
5.3.1 As Bactérias	88
5.3.2 Bolores	88
5.3.3 Fungos de Podridão e Fungos Cromogéneos	89
5.3.3.1 Generalidades	89
5.3.3.2 Fungos de Podridão	93
5.3.3.2.1 Podridão Branca	93



5.3.3.2.2 Podridão Castanha	93
5.3.3.2.3 Podridão Mole	94
5.3.3.3 Fungos Cromogéneos	95
5.3.4 Os Insectos Xilófagos	96
5.3.4.1 Carunchos	96
5.3.4.2 Térmitas	105
5.3.4.3 Formigas Carpinteiras	114
5.3.4.4 Abelhas Carpinteiras	115
5.3.4.5 Xilófagos Marinhos	117
<b>5.4 Patologias de Origem Estrutural</b>	119
<b>5.5 Bibliografia - Capítulo 5</b>	123
 <b>Capítulo 6 - Inspeção e Diagnóstico em Estruturas de Madeira</b>	127
<b>6.1 Introdução</b>	127
<b>6.2 Ensaaios e Equipamentos</b>	131
6.2.1 Ferramentas de Apoio à Inspeção Visual	131
6.2.2 Higrómetro	135
6.2.3 Métodos Globais (GTM)	136
6.2.3.1 Ultra-Sons	136
6.2.4 Métodos Locais (LTM)	140
6.2.4.1 Pilodyn	140
6.2.4.2 Resistógrafo	142
<b>6.3 Metodologia de Inspeção e Diagnóstico</b>	145
<b>6.4 Bibliografia - Capítulo 6</b>	166
 <b>Capítulo 7 - Caso de Estudo - Mosteiro de Santa Maria de Pombeiro</b>	167
<b>7.1 Objectivo</b>	167
<b>7.2 Enquadramento Histórico</b>	167
<b>7.3 Levantamento Histórico de Utilizações, Patologias e Intervenções na Área de</b>	168
<b>7.4 Caracterização da Área de Estudo</b>	170
<b>7.5 Estudo de Campo</b>	173
7.5.1 Metodologia da Inspeção Realizada	173
7.5.1.1 Selecção das Vigas a Ensaiar	173
7.5.1.2 Equipamentos Utilizados	174
7.5.1.3 Procedimento de Inspeção	174
<b>7.6 Estudo Laboratorial</b>	181
7.6.1 Metodologia do Procedimento Laboratorial	182
7.6.1.1 Selecção dos Provetes a Ensaiar	182
7.6.1.2 Equipamentos Utilizados	182
7.6.1.3 Procedimento Experimental	183

<b>7.7 Apresentação e Análise dos Resultados</b>	185
7.7.1 Apresentação dos Resultados do Estudo Laboratorial	185
7.7.2 Apresentação e Análise dos Resultados das Vigas Inspeccionadas	187
7.7.2.1 Apresentação e Análise dos Resultados da Inspeção Visual e dos Ensaios	187
7.7.2.2 Análise dos Pontos de Ensaio das Vigas Inspeccionadas	198
7.7.2.3 Avaliação do Estado de Conservação das Vigas	199
7.7.2.4 Avaliação Detalhada de 2 Vigas	200
7.7.2.4.1 Viga V13	200
7.7.2.4.2 Viga V25	205
<b>7.8 Bibliografia - Capítulo 7</b>	212
 <b>Capítulo 8 - Conclusões</b>	213
<b>8.1 Considerações Gerais</b>	213
<b>8.2 Sugestões para Futuro Trabalho</b>	215
 <b>Anexos</b>	
Anexo 1	217
Anexo 2	223
Anexo 3	229
Anexo 4	239

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1- Teores em Água Aconselhados de Acordo com a Utilização da Madeira	46
Tabela 3.2 - Classificação da Madeira de Acordo com o seu Teor em Água	47
Tabela 3.3 - Classes de Reacção da Madeira ao Fogo de Acordo com a Espessura e a Classe Botânica	56
Tabela 4.1 - Classes de Durabilidade Natural Para Madeira Maciça	71
Tabela 4.2 - Classes de Tratabilidade para Madeira Maciça	72
Tabela 4.3 - Classes de Risco para Madeira Maciça	74
Tabela 4.4 - Exigências de Durabilidade e de Tratamento Preservador de Acordo com a Classe de Risco	75
Tabela 7.1- Dados Geométricos das Vigas Principais da Área de Estudo	171
Tabela 7.2 - Equipamentos Utilizados na Inspeção	174
Tabela 7.3 - Equipamentos Utilizados no Procedimento Experimental Laboratorial.	183
Tabela 7.4 - Resultados do Teor em Água dos Provetes.	185
Tabela 7.5 - Resultados do Pilodyn e dos Ultra-sons dos Provetes	186
Tabela 7.6 - Resultados da Área Total e no Intervalo de [20;140] do Perfil Resistográfico dos Provetes	186
Tabela 7.8 - Resumo dos Resultados da Inspeção Visual - Parte 1	188
Tabela 7.8 - Resumo dos Resultados da Inspeção Visual - Parte 2	189
Tabela 7.9 - Resumo dos resultados obtidos pelos ensaios no Ponto A	191
Tabela 7.10 - Resumo dos resultados obtidos pelos ensaios no Ponto B.	191
Tabela 7.11 - Resumo dos resultados obtidos pelos ensaios no Ponto C.	192
Tabela 7.12 - Limites Superior e Inferior dos Resultados Obtidos das Vigas Inspeccionadas.	193
Tabela 7.13 - Distribuição das Vigas Inspeccionadas em Relação aos Valores Médios dos Provetes.	195
Tabela 7.14 - Relação Entre a Percentagem de Vigas Inspeccionadas que Atingem uma Percentagem do	196
Tabela 7.15 - Estado de Conservação das Vigas Inspeccionadas.	199

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Aplicação de alavanca de madeira.	5
Figura 2.2 - Transporte de pedra pesada sobre troncos rolantes.	6
Figura 2.3 - Estrutura de madeira da Pré-história.	6
Figura 2.4 - Maquete de atelier de escultores de madeira no antigo Egipto (Museu do Cairo, Egipto) .	7
Figura 2.5 - Representação dos carpinteiros no antigo Egipto.	7
Figura 2.6 - Estruturas de madeira na Idade do Bronze.	8
Figura 2.7 - Evolução dos yurt desde a antiguidade até à actualidade.	9
Figura 2.8 - Yurt actual (Mongólia).	9
Figura 2.9 - Templo budista Todaiji (Nara, Japão), após algumas intervenções .	910
Figura 2.10 - Templo budista de Horyu-ji (Nara, Japão).	10
Figura 2.11 - Habitação em estrutura de madeira de troncos sobrepostos.	11
Figura 2.12 - Exemplo de ponte militar.	11
Figura 2.13 - Stavkirker (igreja de madeira típica da Noruega).	12
Figura 2.14 - Estrutura de uma Stavkirker .	12
Figura 2.15 - Maquete da estrutura da cobertura de uma Stavkirker .	13
Figura 2.16 - Estrutura em caixa (boxframe structure).	13
Figura 2.17 - Estrutura tipo de uma construção de estrutura em A (cruck frame).	14
Figura 2.18 - Exemplos de construção de estrutura em A (cruck frame) da actualidade, Reino Unido	14
Figura 2.19 - Esquema um piso de um edifício pombalino com paredes em gaiola pombalina, inícios do séc. XI .	15
Figura 2.20 - Palheiros de madeira na Costa Nova.	16
Figura 2.21 - Estrutura de um pavimento em madeira de um edifício de inícios séc. XX.	17
Figura 2.22 - Exemplo de uma asna de madeira de um edifício corrente do séc. XIX.	17
Figura 2.23 - Estrutura de parede divisória interior em “tabique”.	18
Figura 2.24 - Torre miradouro do Korkeasaari Zoo em Helsínquia (Finlândia).	18
Figura 2.25 - “A Onda” , Estação Ferroviária de Westgate, Berna (Suíça).	19
Figura 2.26 - Pavilhão API na FIL, Lisboa .	19
Figura 3.1 - Estrutura de uma árvore.	24
Figura 3.2 - As três divisões estruturais: a) nível macroscópico ; b) nível microscópico ; c) nível sub-microscópico	25
Figura 3.3 - Secção de um tronco de árvore apresentando os constituintes do lenho.	26
Figura 3.4 - Exemplos de árvores resinosas.	28
Figura 3.5 - Tipos de folhas e frutos de árvores resinosas	29
Figura 3.6 - Exemplos de árvores folhosas	30
Figura 3.7 - Exemplos de folhas, de flor e fruto de árvores folhosas	30
Figura 3.8 - Secção transversal de um tronco apresentando os anéis de crescimento	31

Figura 3.9 - Madeira de Primavera e madeira de Verão.	32
Figura 3.10 - Imagem da secção transversal do tronco de pinheiro bravo vista ao microscópio	34
Figura 3.11 - Estrutura microscópica de uma árvore resinosa	35
Figura 3.12 - Imagem da secção transversal do tronco de uma árvore folhosa vista ao microscópio	36
Figura 3.13 - Estrutura microscópica de uma árvore folhosa	37
Figura 3.14 - Tipos de porosidade em folhosas	38
Figura 3.15 - Estrutura da parede celular	40
Figura 3.16 – Fases de saturação das fibras	45
Figura 3.17 - Curvas de humidade de equilíbrio	47
Figura 3.18 - Compressão paralela às fibras	58
Figura 3.19 - Compressão perpendicular às fibras	59
Figura 3.20 - Flexão estática	59
Figura 3.21 - Tracção paralela às fibras	60
Figura 3.22 - Tracção perpendicular às fibras	60
Figura 3.23 - Dureza na direcção paralela às fibras	62
Figura 5.1 - Estrutura do passadiço exterior do Picadeiro d'El Rei (Almeida) com alteração da cor original.	81
Figura 5.2 - Pormenor de uma porta exterior exibindo o aspecto característico da fotodegradação (cor acinzentada e aparecimento do grão)	81
Figura 5.3 - Pilares exteriores no Picadeiro d'El Rei (Almeida) com fissuração provocada pela exposição à radiação solar.	83
Figura 5.4 - Vigas de madeira queimadas por fogo (é visível o aspecto carbonizado) (Monteiro de Tibães, Braga).	84
Figura 5.5 - Imagem ao microscópio da destruição dos componentes celulares por fungos de podridão	90
Figura 5.6 - Fungos de podridão em elementos de madeira.	91
Figura 5.7 - Fungos de podridão em elementos de madeira	92
Figura 5.8 - Corpos de frutificação à superfície da madeira	92
Figura 5.9 - Podridão branca da espécie <i>Phanerochaete chrysosporium</i>	93
Figura 5.10 - Fracturas em forma de cubos e prismas originadas por podridão castanha	94
Figura 5.11 - Podridão castanha	94
Figura 5.12 - Podridão mole provocada pela espécie <i>Chaetomium globosum</i>	95
Figura 5.13 - Fungos cromogéneos de tom azulado	96
Figura 5.14 - Aspecto de vigas de madeira atacadas pelo caruncho	98
Figura 5.15 - Degradação da superfície da madeira devido à infestação por caruncho	98
Figura 5.16 - Insecto adulto <i>Xestobium rufovillosum</i>	99
Figura 5.17 - Insecto adulto <i>Anobium punctatum</i>	100
Figura 5.18 - Dano provocado pelo <i>Anobium punctatum</i>	101
Figura 5.19 - Insecto adulto <i>Hylotrupes bajulus</i>	102

Figura 5.20 - Ataque de uma peça de madeira pelo <i>Hylotrupes bajulus</i>	103
Figura 5.21 - Insecto adulto <i>Lyctus brunneus</i>	104
Figura 5.22 - Insectos Curculionidae adulto	105
Figura 5.23 - Térmitas da espécie <i>Reticulitermes lucifugus</i>	106
Figura 5.24 - Aspecto de elementos de madeira atacados por térmitas	106
Figura 5.25 - Os diversos tipos de castas e as relações entre si numa colónia de térmitas	108
Figura 5.26 - Térmita reprodutora da espécie <i>Reticulitermes lucifugus</i>	109
Figura 5.27 - Térmitas obreiras	110
Figura 5.28 - Danos resultantes de um ataque por térmitas conferindo o aspecto semelhante a folhas de um livro	111
Figura 5.29 - Térmitas	111
Figura 5.30 - Excrementos fecais de térmitas <i>Cryptotermes brevis</i>	112
Figura 5.31 - Galerias produzidas por <i>Cryptotermes brevis</i>	113
Figura 5.32 - Cerne de árvores atacado por <i>Kaloterms flavicollis</i>	113
Figura 5.33 - Excrementos fecais de térmitas <i>Kaloterms flavicollis</i>	114
Figura 5.34 - Formiga carpinteira	114
Figura 5.35 - Galerias e danos provocados por formigas carpinteiras	115
Figura 5.36 - Abelha carpinteira adulta	116
Figura 5.37 - Galerias produzidas pela abelha carpinteira	116
Figura 5.38 - Aspecto da forma adulta do teredo	117
Figura 5.39 - Aspecto da forma adulta do teredo	118
Figura 5.40 - Aspecto de uma limnoria adulta	118
Figura 5.41 - Peça de madeira apresentando uma enorme quantidade de orifícios de limnoria	119
Figura 5.42 - Peça de madeira degradada pela acção da limnoria	119
Figura 5.43 - Fendilhação provocada pelo aumento das cargas na estrutura de madeira (Portaria do Mosteiro de Pombeiro, Felgueiras).	121
Figura 5.44 - Flechas provocadas pelo assentamento da viga principal (Portaria do Mosteiro de Pombeiro, Felgueiras).	
Figura 5.45 - Redução de secção num apoio de um pilar (Portaria do Mosteiro de Pombeiro).	121
Figura 5.46 - Possível fendilhação devido a insuficiente resistência à tracção (Picadeiro D' El Rei, Almeida).	122
Figura 6.1 - Alguns equipamentos de protecção individual.	132
Figura 6.2 - Penetração do palhete	133
Figura 6.3 - Algumas das ferramentas que acompanham a inspecção visual	134
Figura 6.4 - Higrómetro de contacto com eléctrodo de percussão e pontas de eléctrodo de 60 mm	135
Figura 6.5 - Equipamento de ultra-sons	137
Figura 6.6 - Aplicação do método de transmissão de ultra-sons. Pode observar-se o aumento do percurso devido a obstáculos no interior da madeira	138

Figura 6.7 - Diferentes tipos de métodos de aplicação dos ultra-sons: o directo, indirecto e semi-directo	139
Figura 6.8 - Ensaio com o Pilodyn	141
Figura 6.9 - Aspecto do resistógrafo	143
Figura 6.10 - Exemplos de perfis resistográficos em comparação com as secções perfuradas	143
Figura 6.11 - Caracterização da zona envolvente de uma construção	147
Figura 6.12- Extracção do soalho junto às paredes para acesso à entrega das vigas	150
Figura 6.13 - Utilização de lanterna para apoio à inspecção visual	150
Figura 6.14 - Levantamento geométrico da estrutura	151
Figura 6.15 - Utilização de espelho extensível para observação de partes do elemento em zonas inacessíveis	153
Figura 6.16 - Limpeza da superfície da madeira com escova macia.	154
Figura 6.17 - Identificação das características físicas dos elementos	154
Figura 6.18 - Identificação da ventilação dos apoios	155
Figura 6.19 - Identificações de deformações nos elementos, medição da flecha a meio vão	156
Figura 6.20 - Aspecto de uma viga atacada por caruncho	157
Figura 6.21 - Ferramentas de auxílio à inspecção visual	159
Figura 6.22 - Utilização de higrómetro com eléctrodo de percussão	160
Figura 6.23 - Avaliação da dureza superficial com o Pilodyn.	161
Figura 6.24 - Aplicação do Resistógrafo	162
Figura 6.25 - Aplicação de ultra-sons pelo método directo	163
Figura 6.26 - Pormenor de ligação entre elementos diferentes	164
Figura 7.1 - Mosteiro de Santa Maria de Pombeiro	167
Figura 7.2 - Edifícios do Mosteiro de Pombeiro pertencentes à ala poente	169
Figura 7.3 - Planta do 2º piso da ala poente assinalando a área de estudo.	169
Figura 7.4 - Área de estudo	170
Figura 7.5 - Planta estrutural do pavimento da área de estudo	172
Figura 7.6 - Designação dos pontos inspeccionados por cada viga	173
Figura 7.7 - Mau estado de conservação do soalho do 2º piso	175
Figura 7.8 - Observação de viga sem limpeza da camada de detritos superficiais.	176
Figura 7.9 - Identificação de defeitos da madeira	176
Figura 7.10 - Identificação de defeitos da madeira	176
Figura 7.11 - Identificação da ventilação nos apoios	157
Figura 7.12 - Inspeção visual com auxílio de ferramentas	177
Figura 7.13 - Identificação de ataques biológicos	178
Figura 7.14 - Esquema da aplicação do higrómetro	179
Figura 7.15 - Esquema da aplicação do Pilodyn	179
Figura 7.16 - Esquema da aplicação do Resistógrafo	180
Figura 7.17 - Esquema da aplicação dos ultra-sons.	181

Figura 7.18 - Provetes de carvalho ensaiados em laboratório	182
Figura 7.19 - Registo fotográfico de algumas faces do provete P1.	183
Figura 7.20 - Marcação dos pontos de ensaio	184
Figura 7.21 - Aplicação do higrómetro num provete de ensaio.	184
Figura 7.22 - Perfil Resistográfico correspondente à média dos provetes	186
Figura 7.23 - Ultra-sons Versus Pilodyn (vigas inspeccionadas	196
Figura 7.24 - Pilodyn Versus teor em água (vigas inspeccionadas).	197
Figura 7.25 - Forte ataque de caruncho localizado a meio vão (viga V13).	201
Figura 7.26 - Fenda longitudinal na zona entre o meio vão e o apoio C (viga V13).	201
Figura 7.27 - Manchas de humidade existentes na zona a meio vão (viga V13).	202
Figura 7.28 - Perfis resistográficos dos pontos A, B e C (viga V13).	202
Figura 7.29 - resistográfico comparativo com os resultados da média dos provetes (viga V13).	204
Figura 7.30 - Aspecto da superfície da madeira no ponto C	206
Figura 7.31 - Fungos de podridão castanha junto ao ponto C (viga V25).	206
Figura 7.32 - Zonas atacadas pelo caruncho pequeno (viga V25).	207
Figura 7.33 - Perfis resistográficos dos pontos A, b e C (viga V25).	207
Figura 7.34 - Perfil resistográfico comparativo com os resultados da média dos provetes (viga V25).	209



## **1. INTRODUÇÃO**

### **1.1 Considerações Gerais**

A actual crise económica teve por consequência directa uma grave crise no sector imobiliário, tendo conduzido a uma diminuição do volume de construção de edifícios novos. Em termos nacionais, este fenómeno em conjunto com a dificuldade do recurso ao crédito para compra de habitação própria e a entrada em vigor da nova lei da reabilitação urbana, fez renascer o mercado do arrendamento. Assiste-se portanto ao nascimento de uma transformação no sector da construção que já há muitos anos se aguardava, em que os edifícios antigos estão a começar a ser reabilitados com o objectivo de serem arrendados. Curiosamente, com a reabilitação dos edifícios antigos localizados nos centros urbanos, está a surgir novamente o desejo das pessoas se fixarem nos centros das cidades, aumentando assim o interesse pela preservação do património arquitectónico.

A maioria dos edifícios antigos nos centros históricos urbanos, são constituídos por paredes resistentes em alvenaria de granito e, por pavimentos e coberturas em madeira. A madeira que foi um material tradicional com utilização milenar, caiu nas últimas décadas no esquecimento, e o seu desuso na indústria da construção, deveu-se ao facto do cálculo e dimensionamento de estruturas de madeira ter estado arredado durante muitos anos dos planos curriculares das diversas licenciaturas no país. Esta situação esteve intimamente associada, por um lado, à inexistência durante muitos anos de regras e normas de cálculo unanimemente aceites pela comunidade científica e adoptada para fins de projecto, e por outro, devido à escassa oferta no mercado. Este facto tornou os técnicos da área da conservação e reabilitação de edifícios pouco aptos para lidarem com a patologia típica que a madeira pode apresentar. Existe actualmente nas obras de intervenção em edifícios antigos em madeira, uma postura pouco economicista, na medida em que como existe um desconhecimento do material, os técnicos são levados a optar pela demolição completa da estrutura de madeira, sendo normalmente executada uma estrutura de betão armado em substituição. Cabe deste modo à comunidade científica, partilhar os seus conhecimentos para se dotar os técnicos deste sector de ferramentas e conhecimentos, que permitam a realização de planos de inspecção e diagnóstico capazes de contribuir para a salvaguarda de cada edifício, com o objectivo de definir-se quais os elementos a manter, a

substituir, ou a reparar, podendo conduzir a uma economia de custos quando se conclui que a estrutura está em bom estado.

Podendo de alguma forma dar um contributo na resolução da problemática aqui apresentada, nesta dissertação apresentar-se-á a descrição de uma metodologia de inspecção e diagnóstico com recurso a ensaios não destrutivos (NDT), apresentando-se um caso de estudo em que se aplicou uma metodologia previamente delineada.

## **1.2 Objectivos**

Esta dissertação tem por objectivo estabelecer uma metodologia de inspecção e diagnóstico com recurso a ensaios não destrutivos.

Como exemplo da aplicação num caso de estudo, concluir-se-á acerca do estado de conservação de 17 vigas do pavimento do corredor de acesso às celas do 2º andar do Mosteiro de Santa Maria de Pombeiro, em Felgueiras, indicando quais as vigas a manter, ou a substituir totalmente, ou parcialmente.

Os diversos ensaios não destrutivos utilizados serão avaliados para verificar a dispersão dos resultados entre os diferentes métodos, as vantagens e limitações destes, bem como a relação entre estes e os resultados obtidos com a inspecção visual.

A fim de se atingir os objectivos acima mencionados, esta dissertação prevê a aplicação dos seguintes métodos de ensaio:

- inspecção visual com recurso a equipamentos tradicionais e electrónicos;
- penetração com o Pilodyn;
- perfuração com o Resistógrafo;
- utilização de ultra-sons;
- ensaios laboratoriais em provetes de madeira de carvalho, com a aplicação dos mesmos métodos da metodologia do caso de estudo.

O trabalho proposto tem como objectivo último contribuir para uma área muito diminuta de conhecimento, em que grande parte dos ensaios não destrutivos não se encontra convenientemente explicada na bibliografia disponível. Espera-se com isto contribuir de uma forma qualitativa para a inspecção de estruturas de madeira recorrendo a ensaios não destrutivos.

### **1.3 Organização da Dissertação**

O capítulo 2 introduz o tema da madeira descrevendo o percurso do material ao longo da história, desde o início como utensílio até à utilização em edifícios de construção.

No capítulo 3, apresentam-se os diversos assuntos relacionados com a constituição da madeira, como as definições de madeira, das componentes de uma árvore, anéis de crescimento; a definição e diferenças entre os dois tipos de madeira; a estrutura celular; a composição química; as propriedades físicas, químicas e mecânicas.

No capítulo 4, abordam-se as normas técnicas mais usuais relacionadas com a classificação e requisitos da madeira, definindo classes de risco, classes de resistência, durabilidade e tratabilidade.

No capítulo 5, são apresentados os diversos agentes patológicos que podem degradar a madeira, podendo ser abióticos, como a água, o sol, o fogo e os compostos químicos ou bióticos, como os bolores, os fungos de podridão, o caruncho, as térmitas, os xilófagos marinhos, entre outros. Descrevem-se os mecanismos que originam a degradação da madeira, bem como os danos provocados

No capítulo 6, descreve-se uma metodologia de inspecção e diagnóstico de estruturas de madeira com recurso a ensaios não destrutivos; apresentam-se também, os diversos equipamentos que se podem utilizar, descrevendo-se o seu funcionamento, vantagens e limitações.

No capítulo 7, apresenta-se o caso de estudo - Mosteiro de Santa Maria de Pombeiro, caracterizando a área de estudo, descrevendo-se a metodologia de inspecção e diagnóstico efectuada, os resultados obtidos e a respectiva análise.

Por último, no capítulo 8 expõem-se as conclusões da dissertação, bem como sugestões para trabalhos a desenvolver no futuro.

## 2. BREVE HISTÓRIA DA CONSTRUÇÃO EM MADEIRA

### 2.1 Das Primeiras Utilizações à Actualidade

A madeira é um dos materiais de construção mais antigos da humanidade, podendo até ter sido o primeiro material de construção. A abundância de madeira e aliada à sua trabalhabilidade, levou a que se tornasse um material presente nos utensílios e ferramentas diárias, que acompanharam o homem no seu desenvolvimento ao longo do período da Pré-História. Inicialmente a madeira era utilizada segundo técnicas grosseiras, sem qualquer tipo de ajuste da sua forma, isto é, partiam-se manualmente os ramos das árvores, e estes, por sua vez serviam como alavanca para auxiliar ao deslocamento de pedras (ver Figura 2.01), ou como arma para caçar, ou defesa contra animais selvagens. Mais tarde o homem descobriu o fogo através da fricção de elementos de madeira.



Figura 2.1 - Aplicação de alavanca de madeira [2.01].

As primeiras utilizações da madeira foram condicionadas pelas ferramentas que o Homem possuía naquela altura, sendo apenas utilizada madeira de árvores de pequenas dimensões. Com a evolução, também se desenvolveram as ferramentas com que a madeira era cortada e trabalhada, permitindo assim que fossem utilizadas árvores de maiores dimensões. Com a necessidade de transportar objectos pesados para distâncias cada vez maiores, encontrou-se o método de deslizar sobre troncos pedras pesadas (ver Figura 2.2), facto que antecedeu o aparecimento da roda [2.01].

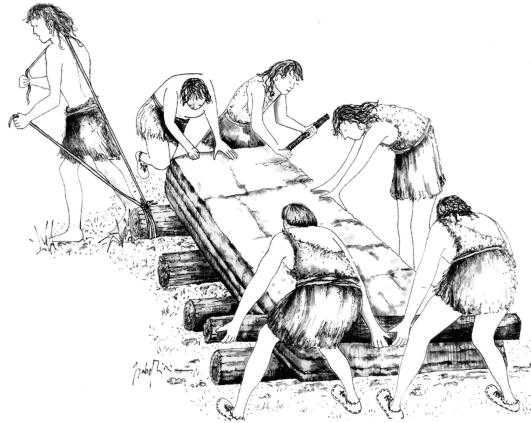


Figura 2.2 - Transporte de pedra pesada sobre troncos rolantes [2.01].

Com os meios de elevação em desenvolvimento e, também através da força dos braços, já na Pré-História eram utilizados pilares e vigas de madeira na construção de abrigos e habitações. Posteriormente essas estruturas eram forradas a colmo, folhas de árvores, terra, entre outros. A madeira concedeu ao Homem a oportunidade de abandonar as cavernas para habitar noutros locais que seriam mais propícios para a sobrevivência. Inicialmente eram construídas cabanas com uma estrutura de suporte constituída por ramos e canas, com uma cobertura formada por uma mistura de folhas e argila, colmo ou peles de animais. Possivelmente, as primeiras estruturas de madeira seriam dois paus cravados no solo e unidos no topo superior através de tiras de pele, ou de folhas de plantas (ver Figura 2.3). Estas estruturas seriam semelhantes aos teepees americanos (estruturas muito mais recentes).

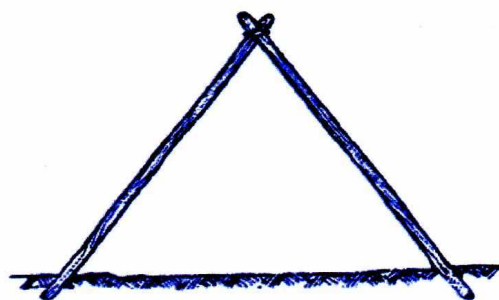


Figura 2.3 - Estrutura de madeira da Pré-história [2.02].

Os vestígios de madeira mais antigos têm aproximadamente 200 a 250 mil anos [2.03], e a grande maioria dos objectos da antiguidade não conseguiu resistir até à data actual, tendo perecido ao tempo.

O arco e flecha, utilizados como arma para caçar, normalmente construídos com madeira de carvalho e espruce, apareceram à aproximadamente 30 mil anos.

Milhares de anos depois, por meados de 2575 a.C. surgiu a civilização egípcia, com aplicações versáteis e otimizadas da madeira, aplicando-a em inúmeras funções, tais como, peças de mobiliário (mesas, cadeiras, armários, camas, entre outras), embarcações, ferramentas de trabalho, túmulos, objectos decorativos, baús, entre outras coisas. Havia um predomínio de carpinteiros, pois estes eram hábeis em esculpir a madeira (ver Figuras 2.4 e 2.5).



Figura 2.4 - Maquete de atelier de escultores de madeira no antigo Egipto (Museu do Cairo, Egipto) [2.04].

A grande maioria da madeira utilizada provinha de países do Mediterrâneo Ocidental, em que as espécies mais procuradas eram o Cedro, Cipreste, Carvalho, Pinho, Figueira do Egipto, Salgueiro, para além de muitas outras. Mas a madeira de Cedro encontrava-se presente no maior número de objectos.

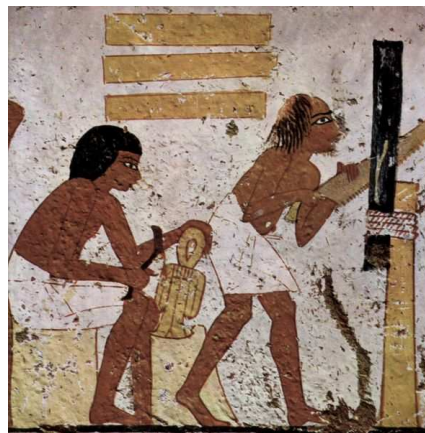


Figura 2.5 - Representação dos carpinteiros no antigo Egipto [2.05].

Com o aparecimento da civilização romana a madeira começou a ser empregue em paredes, em coberturas de habitações e, em pavimentos estruturais. Os romanos utilizavam o sistema de paredes “opus craticium”, que consistia em paredes com uma estrutura de madeira, preenchida por alvenaria de pedra disposta de forma irregular, aligeirada com argamassa de pedaços de cerâmica numa pasta de palha e argila [2.06]. Foi durante a existência desta civilização que foi construída a primeira ponte de madeira sobre o rio Tibre [2.01], em 621 a. C., Ponte Sublicius (Ponte das Estacas), ligava Roma à via da Etrúria.

Um dos povos contemporâneos dos egípcios e dos romanos, foram os gregos e, na Grécia antiga a construção dos primeiros templos terá sido executada através de troncos, vigas e tábuas de madeira, assentes sobre um podium de pedra [2.07].

Por altura da idade do bronze, as estruturas de madeira vindas da Pré-História adquirem uma nova complexidade, aumentando o vão livre interior e, exigindo assim um apoio intermédio, um pórtico interior [2.02]. Esse pórtico era constituído por dois pilares de madeira sobre os quais assentava uma peça horizontal designada por contra nível. Estas estruturas eram espaçadas de poucos metros e, entre elas, existiam madres de madeira para travamento, dispostas perpendicularmente aos troncos inclinados (ver Figura 2.6). No topo do cruzamento entre os troncos inclinados existia um tronco de madeira que unia as diversas estruturas.

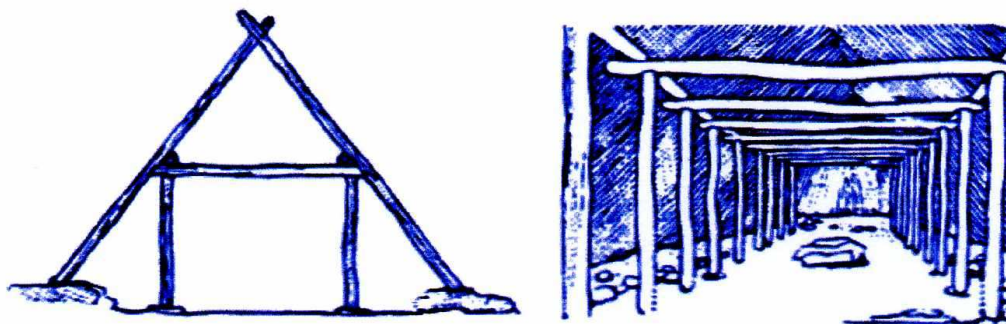


Figura 2.6 - Estruturas de madeira na Idade do Bronze [2.02].

Também durante a Idade do Bronze, cerca de 450 a.C., algures na Sibéria, uma das construções típicas eram os yurt. Os yurt consistiam em troncos de madeira arqueados e, entrelaçados entre si numa extremidade [2.08]. Como se pode ver na Figura 2.7, a evolução do yurt partiu de uma construção semelhante a um teepee e, desenvolveu-se até uma estrutura de



maior dimensão que ainda hoje existe na Mongólia e, que é uma das construções típicas do deserto (ver Figura 2.8).

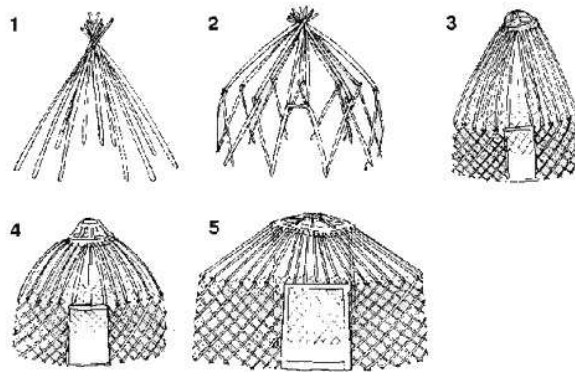


Figura 2.7 - Evolução dos yurt desde a antiguidade até à actualidade [2.08].



Figura 2.8 - Yurt actual (Mongólia) [2.09].

No Japão, no início do século V (607 a.C), apareceram os templos budistas (ver Figura 2.9), que consistiam em edifícios destinados ao culto religioso, construídos totalmente em madeira e, caracterizavam-se por ter uma arquitectura inovadora, de formas diferentes do convencional, atingindo alturas elevadas para a época [2.10]. A estrutura resistente era totalmente em madeira, assim como todos os revestimentos interiores e exteriores. Os templos ao serem construídos em madeira permitiam uma maior rapidez na execução, eram estruturas leves e, conseguiam formas arquitectónicas mais belas e próximas do “divino”, o que não era conseguido com recurso a alvenaria de pedra. A madeira proporcionava aos templos uma das suas principais características, a desmontagem. Os templos eram construídos e posteriormente desmontados e, remontados noutro local [2.07]. O transporte era assim mais fácil do que com qualquer outro material de construção e, a leveza do material e a simplicidade com que os elementos se remontavam eram ideais para o propósito.



Figura 2.9 - Templo budista Todaiji (Nara, Japão), após algumas intervenções [2.11].

O avanço cultural e temporal reflecte-se na arquitectura dos templos, que com o passar dos anos sofriam adaptações e aumentos, sendo adequados às exigências culturais próprias de cada fase da história. Ao longo dos anos os templos foram remodelados e reabilitados e, apesar das acções sísmicas e dos incêndios, ainda hoje alguns deles permanecem intactos, como o templo de Horyu-ji (ver Figura 2.10), localizado em Nara, que é um dos mais antigos do Japão.



Figura 2.10 - Templo budista de Horyu-ji (Nara, Japão) [2.12].

A utilização da madeira era muito variada e, desenvolvia-se de acordo com cada civilização. O clima de cada local, a topografia do terreno e a diversidade arbórea determinavam uma utilização diferente do material. Por vezes era combinada a sua interacção com outros materiais, tais como, a argila, a pedra, a palha e o ferro. O homem vislumbrou neste material uma fonte inesgotável de oportunidades. Com a necessidade da expansão marítima ocorreu uma partilha de cultura e conhecimento, originando fusões nas técnicas de construção em madeira.

Entre os séculos VII e VIII, desenvolve-se nos países nórdicos um tipo de construção de madeira em troncos sobrepostos (log construction ou corner-joined) (ver Figura 2.11).



Figura 2.11 - Habitação em estrutura de madeira de troncos sobrepostos [2.13 ; 2.14].

As habitações de madeira em troncos sobrepostos, possuem troncos dispostos horizontalmente, empilhados uns em cima dos outros, tendo as extremidades recortadas para efectuarem o encaixe. Entre os troncos eram colocadas ripas de madeira como isolamento térmico, e nas construções mais pobres era utilizada uma espécie de pasta para preencher os vazios entre os troncos [2.07]. A arquitectura dos países nórdicos, era caracterizada por paredes de madeira muito espessas, com capacidade para reduzir a condutibilidade térmica das paredes e, para assim, isolar, proteger, a habitação do frio.

Ainda durante o século VIII surgiram construções militares, como as pontes (ver Figura 2.12), fortificações e os castelos, em que os pavimentos interiores das torres eram em madeira [2.01].

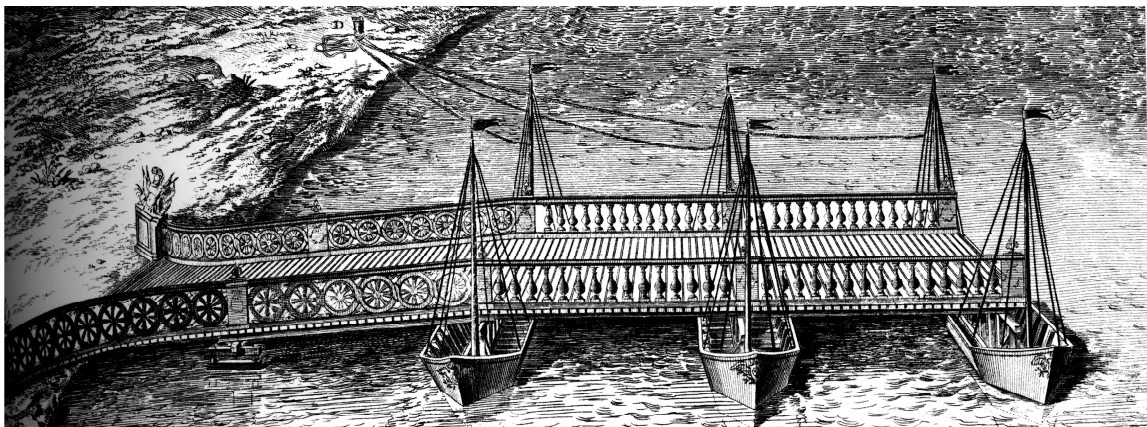


Figura 2.12 - Exemplo de ponte militar [2.01].

Entre os séculos XII e XIV, um novo tipo de estrutura de madeira era aplicado na construção de

igrejas na Noruega, as “Stavkirker” (ver Figura 2.13) [2.10]. Eram designadas por igrejas “stave” devido à sua estrutura principal ser formada por “staves” (pilares) [2.07]. Existem factos que comprovam que também existiram noutros países do norte da Europa.



Figura 2.13 - Stavkirker (igreja de madeira típica da Noruega) [2.15].

As “Stavkirker” são formadas por uma estrutura de forma cúbica, isto é, sobre uma laje de fundação em pedra, assentam em vigas de madeira formando um quadrado, em que nos cantos existem pilares de madeira encastrados nas vigas. No topo dos pilares (staves) existem vigas de madeira, dispendo-se num quadrado paralelo ao quadrado da fundação, em que sobre estas vigas apoiam outros pilares de madeira, um em cada canto, inclinados para o centro do quadro, formando assim a nave central [2.16]. Noutro tipo de construção stave mais complexo, em redor da estrutura anteriormente descrita podemos ter uma estrutura semelhante no seu interior mas a uma altura mais elevada (ver Figura 2.14).

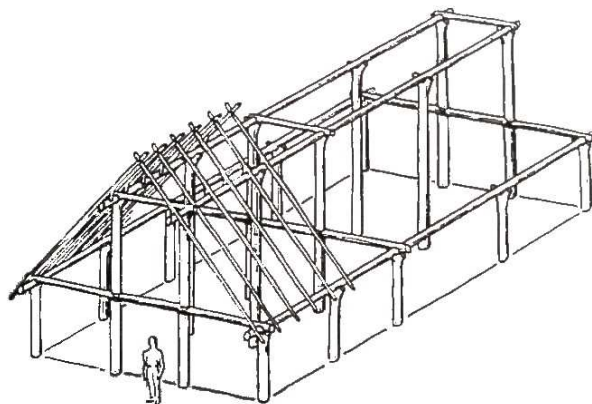


Figura 2.14 - Estrutura de uma Stavkirker [2.14].



Entre os pilares eram colocadas tábuas grossas de grande volume, para formarem as paredes. Normalmente eram colocados dois a quatro pilares por parede [2.15]. Na figura 2.15 podem-se observar partes da estrutura de cobertura das Stavkirker.

Ainda hoje existem algumas destas igrejas, tendo sido preservadas ou longo dos anos através da substituição dos elementos deteriorados e, através de uma maior protecção da sociedade norueguesa e este tipo de construção.

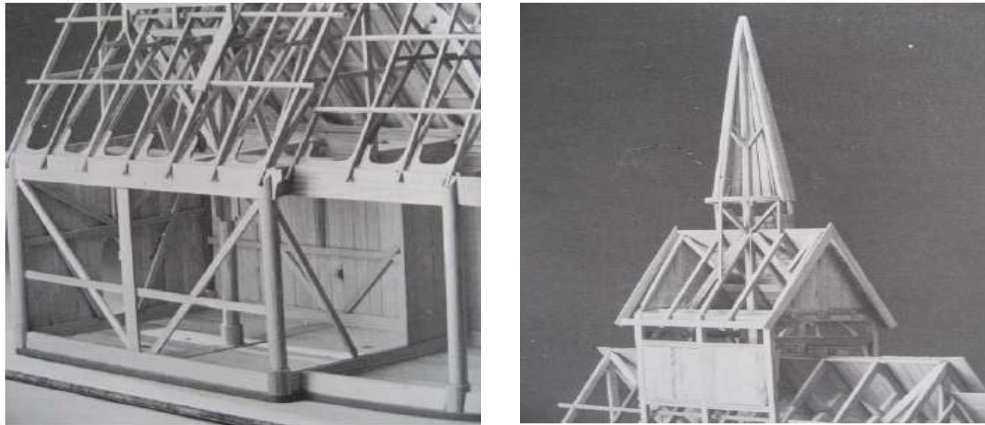


Figura 2.15 - Maquete da estrutura da cobertura de uma Stavkirker [2.14].

No Reino Unido, em meados do século XIV, apareceram as estruturas em caixa (box frame) (ver Figura 2.16). Este método construtivo consiste em paredes resistentes que suportam as cargas da cobertura. As paredes apoiam numa fundação de pedra e, são formadas por pórticos de madeira com contraventamento [2.17].

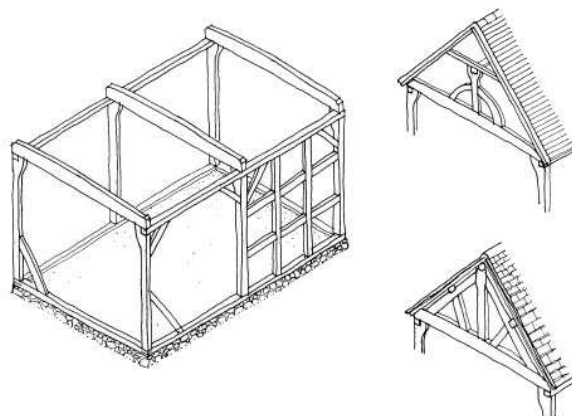


Figura 2.16 - Estrutura em caixa (boxframe structure) [2.17].

Após as construções em caixa, apareceram também no Reino Unido, as construções de

estrutura em A (“cruck frame”) (*ver Figura 2.17*). O sistema construtivo é constituído por troncos de árvore laminados longitudinalmente, para permitir a utilização das elementos do mesmo tronco. No topo superior os troncos são ligados, encontrando-se as outras extremidades fixas no solo, numa fundação de pedra, ou sobre vigas de madeira, formando uma espécie de arco. Os “arcos” eram travados com travessas de madeira dispostas transversalmente, o que ajudava ao apoio do revestimento, como por exemplo, tábuas de madeira, executando assim as próprias paredes [2.07 ; 2.18].

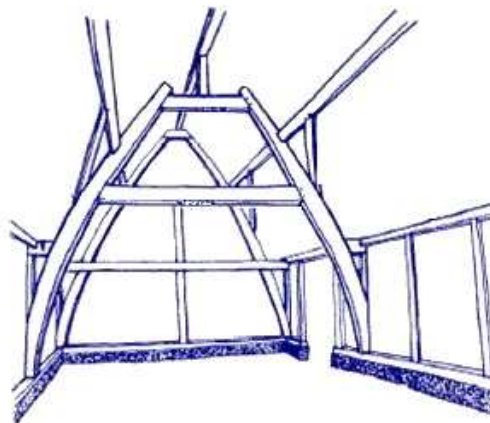


Figura 2.17 - Estrutura tipo de uma construção de estrutura em A (cruck frame) [2.18].

Na Figura 2.18, podem observar-se habitações recentes em madeira de estrutura em A (cruck frame).



Figura 2.18 - Exemplos de construção de estrutura em A (cruck frame) da actualidade, Reino Unido [2.19 ; 2.20].

Devido aos factores de degradação da madeira e aos incêndios, as construções mais antigas de madeira não sobreviveram até à actualidade. Os longos períodos de guerra e de incêndios

destruíram uma grande parte dos edifícios de madeira, restando apenas os elementos de pedra [2.07].

Na Idade Média, o sistema construtivo romano, “opus craticium”, permanecia como prática habitual, tendo evoluído para um novo tipo de construção designado por “collombage” em França, por “gaiola” em Portugal e, por sistema “ingabbiati” em Itália. Este sistema construtivo dotava os edifícios de resistência estrutural aos sismos [2.06].

Em Lisboa, após o terramoto de 1755, iniciou-se a aplicação do sistema de “gaiola”, com algumas modificações e, neste período designou-se por “gaiola pombalina” (ver Figura 2.19). A “gaiola pombalina” era caracterizada por uma moldura de madeira rectangular, contraventada com uma cruz diagonal e uma cruz vertical. A cruz resultante do cruzamento das duas cruzes denomina-se cruz de santo andré. Estas estruturas eram preenchidas com alvenaria de pedra, por forma a ocultar a estrutura na alvenaria [2.21].

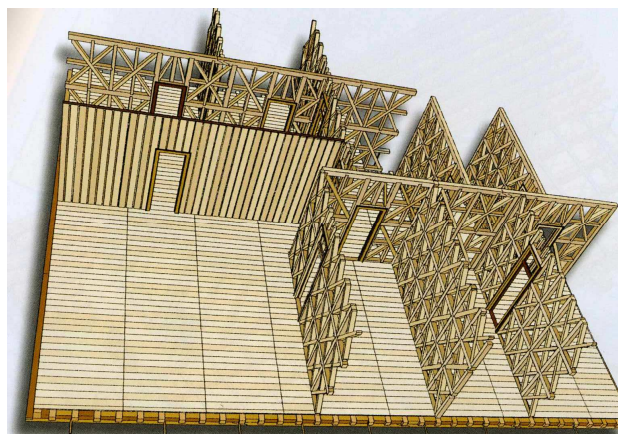


Figura 2.19 - Esquema um piso de um edifício pombalino com paredes em gaiola pombalina, inícios do séc. XI [2.21].

Em Portugal, antes das Ordenações Manuelinas, a construção de edifícios convencionais era executada em madeira, os edifícios em alvenaria estavam reservados para construções “imponentes”, pertencentes ao clero e à nobreza. A partir do século XVI, houve uma substituição da madeira pela alvenaria, reservando-se a madeira para a utilização na estrutura dos pavimentos e da cobertura, método construtivo que se manteve até à utilização do betão armado em edifícios. Com a expansão da construção em betão armado, os “edifícios em placa”, a madeira deixou de ser utilizada como material estrutural, com excepção da estrutura em coberturas [2.09].

Nas zonas pantanosas ou em zonas ribeirinhas, em que o solo encontrava-se com o nível freático muito elevado, era a utilização de estacas de madeira, ao nível das fundações, para facilitar o arranque das alvenarias.

Nos finais do século XVIII, no litoral central português, começaram-se a construir palheiros de madeira (ver Figura 2.20). Os palheiros eram construídos inteiramente em madeira, as paredes eram formadas por barrotes verticais, aos quais eram pregados tábuas de madeira. Sobre os barrotes eram colocadas vigas e, nos cantos existia contraventamento através da introdução de elementos diagonais [2.07]. A cobertura era composta por asnas de madeira, em que o revestimento exterior era em palha e, só mais tarde, em telha cerâmica.



Figura 2.20 - Palheiros de madeira na Costa Nova [2.23].

A partir do século XIX e até meados do século XX, a madeira era o material de construção mais utilizado na constituição de pavimentos, quer em termos estruturais, quer em termos não estruturais [2.21]. A solução corrente consistia num sistema de vigas de madeira, dispostas paralelamente, com espaçamento de 20 a 40 cm entre elas, apoiadas nas extremidades em paredes resistentes de alvenaria (ver Figura 2.21). O castanho, o carvalho, seriam as espécies mais utilizadas, nas construções mais antigas poderíamos encontrar a casquinha e o pitespaine, nas construções mais pobres era corrente a utilização de pinho e eucalipto [2.21].

Relativamente às coberturas dos edifícios, a estrutura em asna de madeira (ver Figura 2.22) era a solução construtiva mais aplicada, poderiam apresentar configurações diversas, de acordo com a pendente da cobertura.





Figura 2.21 - Estrutura de um pavimento em madeira de um edifício de inícios séc. XX.



Figura 2.22 - Exemplo de uma asna de madeira de um edifício corrente do séc. XIX [2.03]

As paredes divisórias interiores e, nos pisos elevados as paredes exteriores, dos edifícios já desde há alguns séculos atrás até ao séc. XX, eram constituídas por uma armação de madeira disposta na horizontal, em que posteriormente eram preenchidas com estuque, vulgarmente designadas por “tabique” (ver Figura 2.23).

Após a Revolução Industrial surgiram ferramentas que aumentaram as potencialidades da madeira. Com a industrialização da madeira conseguiu-se inovar a arquitectura das habitações, inicialmente seriam casas de planta rectangular com cobertura inclinada mas actualmente existem edifícios de forma complexa e “inimaginável” (ver Figura 2.24). Uma das vertentes da industrialização foi a pré-fabricação de casas de madeira, que vieram proporcionar um aumento da construção em madeira.

Certamente, outra das inovações que revolucionou totalmente a construção em madeira foi a

introdução da madeira lamelada colada, com este tipo de construção os arquitectos conseguiram ser audazes ao ponto da madeira conseguir rivalizar com os seus concorrentes actuais o aço e o betão. Com este tipo de elementos construtivos conseguem-se vencer grandes vãos e, acima de tudo, consegue-se dar qualquer forma à madeira, algo que não era possível com madeira de secção maciça (ver Figuras 2.25 e 2.26).



Figura 2.23 - Estrutura de parede divisória interior em “tabique” [2.21].



Figura 2.24 - Torre miradouro do Korkeasaari Zoo em Helsinquia (Finlândia) [2.24].

Para além da utilização estrutural, a madeira é actualmente um dos revestimentos mais utilizados no interior das habitações, nas portas, rodapés, pavimentos, mobiliário e escadas. Existe um aumento crescente na utilização da madeira como revestimento exterior de pátios, como os decks, os alpendres, situações que requerem que a madeira seja durável devido à elevada exposição ambiental.

Presentemente o mercado possui uma enorme panóplia de produtos e derivados de madeira, de

diversas secções, diversas cores e para diversas finalidades. Com toda a evolução que a madeira sofreu desde a antiguidade, conseguiu-se chegar ao momento em que é praticamente possível executar qualquer tipo de estrutura em madeira, tendo apenas como limite o custo económico. Como ambição para um desenvolvimento futuro deste material a sociedade aguarda que lhe seja dado o respeito devido, e que seja difundida a sua utilização em grande escala, proporcionando desta forma que a sua produção permita ao comprador pagar um preço mais justo.



Figura 2.25 - “A Onda” , Estação Ferroviária de Westgate, Berna (Suíça) [16].



Figura 2.26 - Pavilhão API na FIL, Lisboa [17].

## 2.2 Bibliografia - Capítulo 2

- [2.01] RODRIGUES, ADRIANO ; 2006 - *História Breve da Engenharia Civil - Pilar da Civilização Ocidental*. Ordem dos Engenheiros Região Norte.
- [2.02] COUTINHO, JOANA ; 1999 - *Madeiras*. Apontamentos de Materiais de Construção I. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [2.03] FEIO, ARTUR ; 2007 - *Estruturas de madeira*. Apontamentos de Patologia das Construções, Mestrado em Engenharia Civil. Universidade do Minho.
- [2.04] BURROWS, ART ; 2005 - *Woodworking in ancient Egypt. Part 1 - Workshops and the Palace*. In Archaeological Diggings.
- [2.05] [www.dictionay.110mb.com/gallery/artist/egyptian\\_pyramids/painting.php?i=maler\\_der\\_grabkrammer\\_der\\_bildhauer\\_nebaum\\_und\\_ipuki.jpg](http://www.dictionay.110mb.com/gallery/artist/egyptian_pyramids/painting.php?i=maler_der_grabkrammer_der_bildhauer_nebaum_und_ipuki.jpg).
- [2.06] MATEUS, JOÃO M. ; 2002 - *Técnicas tradicionais de construção de alvenarias*. Livros Horizonte, Lisboa.
- [2.07] CACHIM, PAULO B. ; 2007 - *Construções em madeira - A madeira como material de construção*. Publindústria, Porto.
- [2.08] [www.woodlandyurts.co.uk/yurt.facts/yurtfacts.html](http://www.woodlandyurts.co.uk/yurt.facts/yurtfacts.html).
- [2.09] [www.en.wikipedia.org/wiki/fil:gorskii\\_004412m.jpg](http://www.en.wikipedia.org/wiki/fil:gorskii_004412m.jpg).
- [2.10] GLANCEY, JONATHAN ; 2000 - *História da Arquitectura*. Dorling Kindersley Limited, Londres.
- [2.11] [www.sacred-destinations.com/japan/nara-todaiji.htm](http://www.sacred-destinations.com/japan/nara-todaiji.htm).
- [2.12] [www.sacred-destinations.com/japan/nara-horyuji.htm](http://www.sacred-destinations.com/japan/nara-horyuji.htm).
- [2.13] [www.finland.fi](http://www.finland.fi).
- [2.14] [www.svalebaek.dk/arlington.pdf](http://www.svalebaek.dk/arlington.pdf).
- [2.15] [www.noruega.org.pt/culture/architecture/churches/stavechurch.htm](http://www.noruega.org.pt/culture/architecture/churches/stavechurch.htm).
- [2.16] [www.academicreview.tripod.com/id46.html](http://www.academicreview.tripod.com/id46.html).
- [2.17] [www.thamehistory.net/topics/timberframes.htm](http://www.thamehistory.net/topics/timberframes.htm).
- [2.18] [www.coam.org.uk/images/workshop%20pdf/ks1Workshops](http://www.coam.org.uk/images/workshop%20pdf/ks1Workshops)
- [2.19] [www.blackandwhitehouses.co.uk](http://www.blackandwhitehouses.co.uk).
- [2.20] [www.woodlands.co.uk/blog/working-with-wood/cruck-frame-buildings](http://www.woodlands.co.uk/blog/working-with-wood/cruck-frame-buildings).
- [2.21] APPLETON, JOÃO ; 2003 - *Reabilitação de edifícios antigos - Patologias e tecnologias de intervenção*. Edições Orion, Amadora.

- [2.22] CÓIAS, VÍTOR ; 2006 - *Inspecções e ensaios na reabilitação de edifícios*. IST Press, Lisboa.
- [2.23] [www.trekearthe.com/gallery/europa/portugal/norte/aveiro/costa\\_nova/photo640699.htm](http://www.trekearthe.com/gallery/europa/portugal/norte/aveiro/costa_nova/photo640699.htm).
- [2.24] [www.dapspace.daaps.uc.ed/rlarsongr/larsonline/bldgindx+76-fibs/korkeasaari2.pdf](http://www.dapspace.daaps.uc.ed/rlarsongr/larsonline/bldgindx+76-fibs/korkeasaari2.pdf)
- [2.25] [www.abbs.com/atu/200612/3b3-4.pdf](http://www.abbs.com/atu/200612/3b3-4.pdf)
- [2.26] [www.carmoestruturas.com/index.htm](http://www.carmoestruturas.com/index.htm)



### **3. A CONSTITUIÇÃO DA MADEIRA**

#### **3.1 Definição de Madeira**

A madeira é um material natural, orgânico e heterogéneo, constituído por uma estrutura celular de um organismo vivo que é a árvore. Designa-se por madeira o conjunto de tecidos que formam o tronco, as raízes e os ramos, excluindo-se a casca [3.01]. No entanto, é comum na vida prática designar-se por madeira apenas os tecidos do tronco e dos ramos mais grossos.

Segundo alguns autores, podem-se definir como vegetais lenhosos (árvores) todas as plantas que possuam mais de 5 m de altura, de acordo com o convencionado em Portugal há alguns anos [3.01].

#### **3.2 As Componentes de Uma Árvore**

A estrutura de uma árvore divide-se em raiz, fuste e copa (ver Figura 3.1). As três componentes têm funções específicas, proporcionando à árvore uma estrutura eficiente, robusta e adaptável às condições envolventes. A raiz tem a função de fixar a árvore ao solo, de captar e absorver água e nutrientes para a subsistência de todo o organismo. Por vezes, com o desenvolvimento da parte aérea da árvore aumenta o seu peso próprio, assim como a exposição à acção do vento, levando a que a raiz se expanda à procura de uma melhor fixação, para maior estabilidade. Ao mesmo tempo, com o aumento do consumo de água e de nutrientes, a raiz consegue-se expandir no solo à procura de zonas que não tenham sido exploradas [3.01]. Existem três tipos de raízes, as profundas, as superficiais e as divergentes. Outra das componentes da árvore, o fuste, é a parte da árvore que confere suporte e estabilidade para resistir às acções do vento e, ao próprio peso. Também é responsável pelo transporte de nutrientes e de água, entre as raízes e as folhas. Consiste na parte do eixo principal que se encontra livre de ramos. A última das componentes, a copa, é constituída por ramos e folhas, tendo como principal função a realização do processo de fotossíntese, produzindo oxigénio e hidratos de carbono necessários à sobrevivência da árvore. A extremidade do eixo principal que possui ramificações designa-se por ponta e, também pode-se definir a copa como o conjunto formado pela ponta e, por todas as ramificações e folhas. À parte superior da copa designa-se por cimo ou coruto.

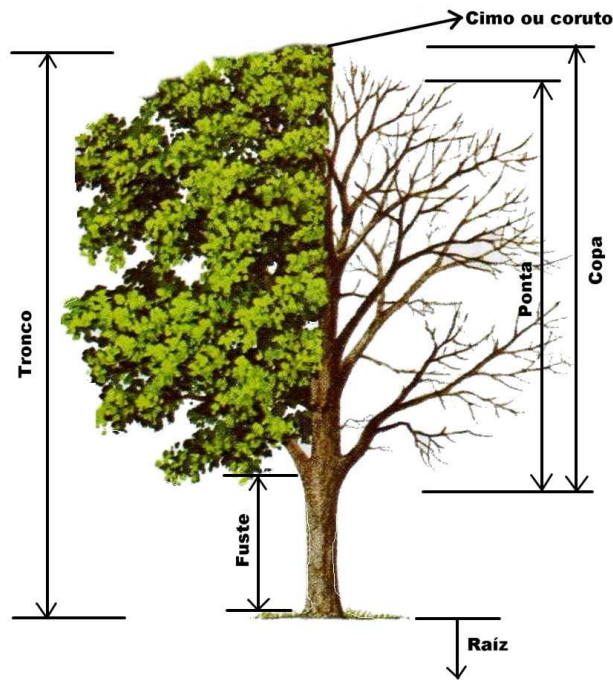


Figura 3.1 - Estrutura de uma árvore [3.02].

Segundo os termos da botânica e dos técnicos da área, o tronco é a parte aérea lenhosa que inclui o eixo principal e todas as ramificações, correspondendo assim, ao conjunto formado pelo fuste e pela copa. Porém, muitos profissionais designam por tronco apenas a parte do eixo principal que se encontra livre de ramos, confundindo-se assim com o termo de fuste [3.01].

A vantagem de se definir convenientemente os conceitos e as designações de uma árvore, é que se consegue estipular quais são as aplicações de cada parte em produtos tecnológicos, o que não seria possível se não houvessem fronteiras definidas. De acordo com as normas utilizadas pelos serviços oficiais em Portugal, para o pinheiro bravo (por exemplo), o fuste é a parte do tronco limitado por um diâmetro de 20 cm ou 25 cm (existem dois critérios diferentes), donde se extrai a madeira. A parte restante (ponta), é utilizada para produzir lenha, ou solaria, caso o diâmetro seja superior a 5,6 cm [3.01].

### 3.3 A Estrutura do Tronco

A estrutura do tronco fornece-nos muita informação acerca do tipo de madeira e dos defeitos, como os nós, por exemplo, que são visíveis a olho nu. Para se compreender melhor a estrutura do tronco, e para uma análise correcta das suas características, é conveniente definirem-se quais os tipos de divisão estrutural existentes na madeira:



- nível macroscópico (ou macroestrutura), parte visível a olho nu, ou com uma lupa de 10 vezes de aumento e, permite averiguar a possível variação da resistência mecânica devido a defeitos visíveis (nós, bolsas de resina, inclinação do fio por exemplo) [3.03];
- nível microscópico (ou microestrutura), necessita de aumentos superiores a 500 vezes e, permite distinguir a diferença de rigidez transversal e longitudinal [3.03];
- nível sub-microscópico (ou ultraestrutura), necessita de aumentos superiores a 3000 vezes e, permite avaliar os fenómenos de retracção e dilatação da madeira [3.03].

Na Figura 3.2, podem-se observar os três tipos de divisão estrutural, correspondendo as Figuras 3.2a e 3.2b a observações realizadas ao microscópio.

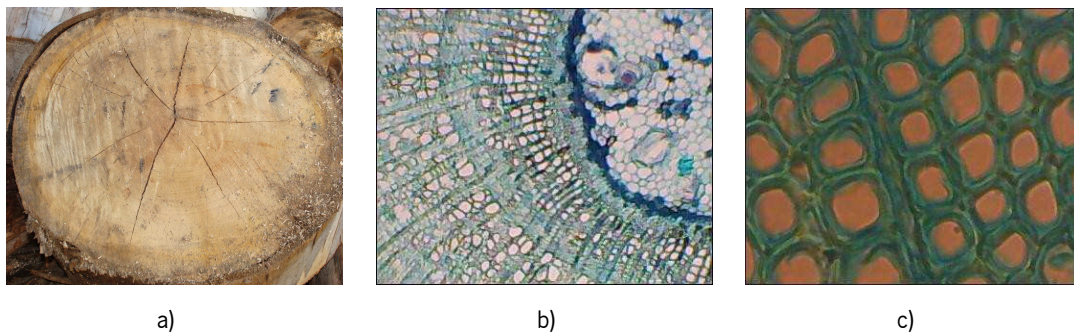


Figura 3.2 - As três divisões estruturais: a) nível macroscópico ; b) nível microscópico ; c) nível sub-microscópico.

### 3.3.1 Crescimento do Lenho

O desenvolvimento da árvore processa-se através da actividade de meristemas primários, responsáveis pelo crescimento das plantas lenhosas apenas no primeiro ano de vida [3.01]. Após o primeiro ano, o crescimento fica a cargo de três tipos de meristemas, considerados secundários: o meristema apical, o meristema câmbio vascular ou câmbio libero-lenhoso e, o meristema felogene ou câmbio suberoso [3.01]. O meristema apical tem como função o crescimento em altura, segundo o eixo axial ou longitudinal. O meristema câmbio vascular ou câmbio libero-lenhoso, é responsável por formar a epiderme e, pelo crescimento de novas camadas concêntricas internas, levando a um aumento progressivo do diâmetro do tronco. A felogene ou câmbio suberoso, sendo exterior ao câmbio vascular, tem a função de protecção, substituindo a epiderme ferida durante o engrossamento do caule secundário. Ao longo dos anos a actividade dos meristemas vai decaindo, prevalecendo apenas a actividade mínima para subsistência da árvore.

### 3.3.2 Constituintes do Lenho

Analisando-se a secção transversal de um tronco podem-se identificar três camadas distintas: a camada interna, lenho ou xilema, a camada mais externa, ritidoma e, a camada intermédia, floema ou líber (ver Figura 3.3) [3.03].

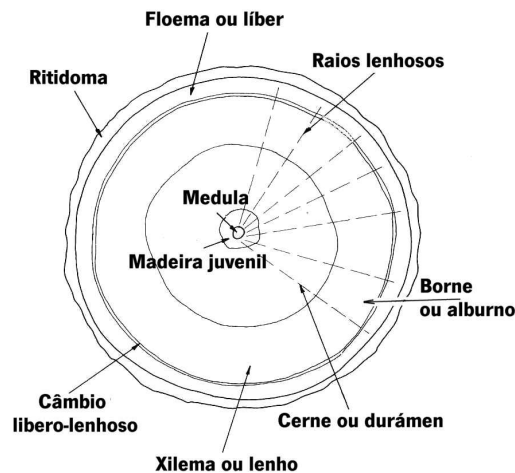


Figura 3.3 - Secção de um tronco de árvore apresentando os constituintes do lenho [3.04].

O lenho ou xilema é a parte mais importante do caule engrossado, sendo constituído por duas partes: o cerne ou durâmen e, o borne ou alburno. O cerne ou durâmen corresponde à parte mais escura, englobando a medula, um núcleo sem qualquer presença de seiva. É formado por células mortas, inactivas, que contêm lenhina, conferindo capacidade de suporte e de estabilidade à árvore, através da rigidez que proporciona. O borne ou alburno, parte externa mais clara, contém água e nutrientes captados pelas raízes. A contornar o lenho ou xilema, o floema ou líber, é responsável pelo transporte de nutrientes sintetizados nas folhas. Na zona mais exterior do tronco, a envolver o floema, encontra-se o ritidoma, tendo a função de conferir protecção ao tronco. É constituído por uma estrutura de tecidos mortos, de espessura variável com a idade e consoante as espécies de árvores. Ao conjunto formado pelo floema e ritidoma designa-se por “casca” [3.01]. A casca contém camadas muito importantes para a protecção da árvore contra agentes agressivos e, contra fenómenos físicos da sua própria estrutura anatómica. Com o crescimento diametral do tronco surgem fendas na casca que são colmatadas com novos tecidos produzidos pelo câmbio suberoso ou meristema suberofelodérmico [3.01]. Formam-se assim duas camadas, uma interior designada por feloderme e, outra exterior designada por periderme. A periderme consiste numa camada de protecção, quase contínua e impermeável, possuindo alguns orifícios que comunicam com o interior para permitir as trocas

gasosas. É constituída por súber, também conhecido por felene ou cortiça, material bem conhecido e utilizado vulgarmente no quotidiano das pessoas. À camada mais exterior da periderme designa-se por ritidoma.

### **3.4 As Primeiras Árvores e a sua Classificação Botânica**

#### **3.4.1 A Evolução das Plantas**

Adaptadas ao ambiente envolvente e transformando-se com as alterações deste, as plantas foram-se desenvolvendo até aparecerem as árvores. As primeiras plantas apareceram há cerca de 400 milhões de anos atrás, possuíam pequenas dimensões e, eram caracterizadas pela ausência de verdadeiras raízes, folhas, flores e frutos [3.01]. Os primeiros espécimes possuíam uma estrutura do caule muito semelhante à estrutura típica da classe de classificação botânica das *gimnospérmicas*, devido à inexistência de células diferenciadas, as células acumulavam a função de transporte e de suporte. Com a selecção natural, a luta constante pela exposição solar, a exposição aos agentes agressivos, a procura de nutrientes e, a propagação da espécie, originou a que mais tarde as plantas desenvolvessem raízes, folhas, flores e frutos. As primeiras espécies de árvores pertencentes às *gimnospérmicas*, já muito semelhantes aos espécimes actuais desta classe, surgiram há 160 milhões de anos e, podem ser relacionados como antepassados das espruces e das araucárias [3.01]. Devido às suas limitações naturais, as *gimnospérmicas* evoluíram no sentido da “construção” de uma estrutura interna mais complexa, aparecendo assim a classe das *angiospérmicas* há aproximadamente 127 milhões de anos. Estas possuíam órgãos de reprodução mais complexos e células diferenciadas, umas com a função de transporte e outras com a função de suporte [3.01].

#### **3.4.2 Gimnospérmicas Versus Angiospérmicas**

De acordo com a classificação botânica as árvores podem-se enquadrar em duas classes que representam a maioria das espécies: a classe das *gimnospérmicas* e a classe das *angiospérmicas*.

##### **3.4.2.1 *Gimnospérmicas***

As *gimnospérmicas* dividem-se em várias classes, sendo a mais importante a classe das *coníferas*. Tecnicamente as *coníferas* designam-se por resinosas, e também podem ser

designadas por árvores de madeira branca (*softwood* na literatura anglo-saxónica). As resinosas podem ser identificadas através das seguintes características:

- não apresentam vasos, possuindo traqueídeos, que consistem em células mortas alongadas, dispostas longitudinalmente topo a topo, possuindo as extremidades abertas, tendo como funções o transporte de nutrientes e o suporte da própria árvore, não possuem células diferenciadas [3.01];
- possuem canais secretores cuja função consiste na produção e transporte de resina;
- as sementes desenvolvem-se numa cavidade aberta, resultando a fecundação a partir de um óvulo nu [3.02];
- as resinosas apresentam raios lenhosos em menor número, possuindo menor resistência aos esforços perpendiculares às fibras devido à insuficiência de contraventamento [3.03];
- a copa das árvores é estreita e alongada [3.02] (ver Figura 3.4);
- possuem folhas compridas e estreitas que podem ser em forma de agulha (ou folha acicular), ou em forma de escama (ou folha escamiforme) (ver Figura 3.5) [3.02];
- apresentam folhas persistentes;
- possuem frutos em forma de cone, podendo possuir escamas lenhosas (ver Figura 3.5) [3.02];
- Geralmente aguentam condições hostis.

Como exemplos de árvores resinosas existem o pinheiro, o cipreste, a espruce, o abeto, entre outras, como podemos ver de seguida na Figura 3.4.



Figura 3.4 - Exemplos de árvores resinosas: a) cipreste ; b) abeto ; c) cedro ; d) pinheiro ; e) espruce [3.02].

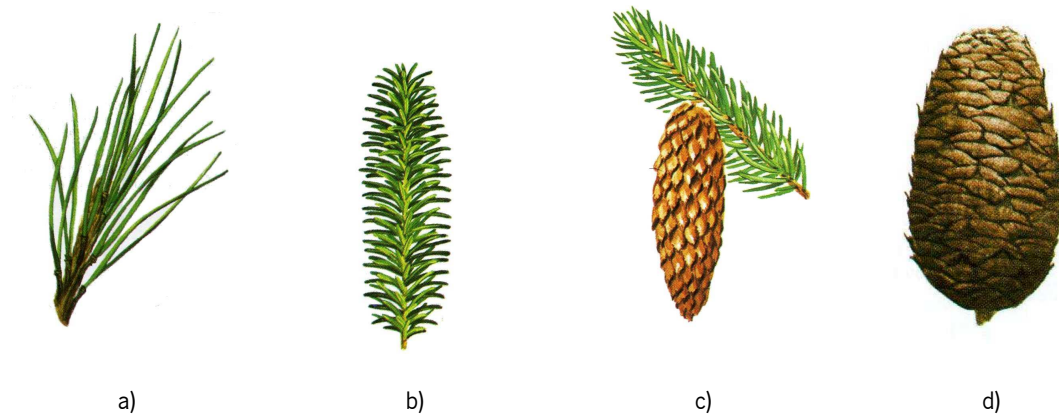


Figura 3.5 - Tipos de folhas e frutos de árvores resinosas: a) Folha acicular; b) Folha Escamiforme; c) e d) Frutos de resinosas (pinhas) [3.02].

#### 3.4.2.2 Angiospérmicas

As *angiospérmicas* dividem-se em dois grupos, as *monocotiledóneas* e as *dicotiledóneas*. Apenas será dada importância às *dicotiledóneas*, só estas podem ser designadas por árvores. Tecnicamente, as *angiospérmicas dicotiledóneas* são designadas por folhosas ou frondosas, sendo também comum o termo madeira dura (*hardwood* na literatura anglo-saxónica). As folhosas distinguem-se das gimnospérmicas devido às seguintes características:

- possuem uma estrutura complexa da flor, havendo uma diversidade de forma, de textura e de cor. A fecundação ocorre dentro de um ovário fechado protegendo os óvulos;
- a copa das árvores é densa, por vezes arredondada e muito larga (ver Figura 3.6).
- as folhas podem ser persistentes ou caducas. São caracterizadas pela sua forma plana constituída por uma rede de finas nervuras (ver Figura 3.7). Por vezes no mesmo indivíduo podem apresentar folhas diferentes [3.01];
- são constituídas por células diferenciadas, isto é, existem células para o transporte de nutrientes e, células para desempenhar a função de suporte, conferindo rigidez à estrutura;
- apresentam um maior número de raios lenhosos, permitindo assim que a sua madeira suporte melhor os esforços perpendiculares ao eixo do tronco;
- podem apresentar densidade variável;
- não suportam habitat hostis.

Como exemplos de árvores folhosas, o carvalho, o sobreiro, o castanheiro, o eucalipto, o choupo, entre outras, como se pode ver na Figura 3.6.

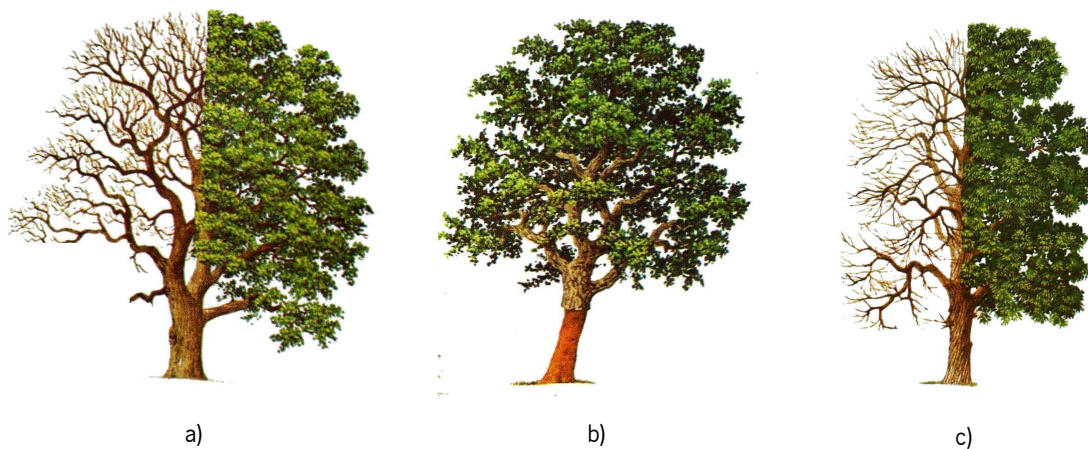


Figura 3.6 - Exemplos de árvores folhosas: a) carvalho ; b) sobreiro ; c) castanheiro [3.02].

Na Figura 3.7, podem-se observar alguns tipos de folha de folhosas, um exemplo de um fruto e de uma flor.

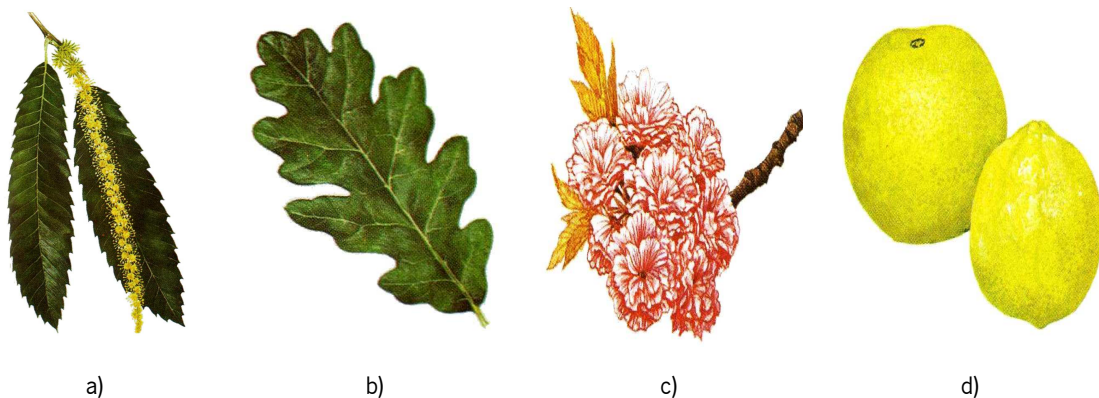


Figura 3.7 - Exemplos de folhas, de flor e fruto de árvores folhosas: a) e b) folhas ; c) flor de cerejeira japonesa ; d) fruto (citrinos) [3.02].

Quer as resinosas, quer as folhosas são igualmente importantes na utilização da madeira. Sendo a aplicação do tipo de madeira dependente da função a desempenhar. Nos capítulos seguintes irá ser aprofundado qual o tipo de madeira, de acordo com a classe, se folhosa ou resinosa, a ser utilizado para desempenhar determinadas funções.

Relativamente ao número de espécies que são comercializadas, as resinosas representam cerca de 500 espécies, enquanto que as folhosas representam cerca de 1500 [33].



### 3.5 Os Anéis de Crescimento

Uma das possibilidades de caracterização da madeira, é pela observação dos anéis de crescimento. Estes podem ser visualizados no plano transversal do tronco, apresentando as sucessivas camadas de crescimento diametral que ocorreram ao longo do tempo (ver Figura 3.8).



Figura 3.8 - Secção transversal de um tronco apresentando os anéis de crescimento [3.06].

Os anéis de crescimento correspondem às novas camadas de lenho formadas no câmbio libero-lenhoso, na parte interior situam-se as camadas de lenho antigas dando lugar na parte exterior à formação de lenho novo. Os anéis de crescimento antigos vão ficando inactivos para a função de transporte de nutrientes ao longo do tempo devido à deposição de lenhina nas paredes dos vasos, isto no caso das folhosas, e nos traqueídeos, no caso das resinosas. As paredes tornam-se portanto mais grossas, diminuindo consequentemente o fluxo de nutrientes a transportar. Ao longo do tempo vão ficando cada vez menos activos, ficando a função de transporte de nutrientes assegurada na zona de formação recente, ou seja, pelos novos anéis de crescimento. Porém, o crescimento não é uniforme ao longo do ano, sendo heterogéneo no seu aspecto e, apresentando capacidades distintas no que diz respeito ao transporte de nutrientes. Com o início da Primavera começa o período de crescimento do lenho, sendo despoletado pelas condições ambientais favoráveis, temperaturas mais elevadas, boa exposição solar, entre outras, apresentando elementos vasculares (vasos ou traqueídeos) de maior diâmetro, com paredes menos espessas e cor mais clara [3.03]. Ao lenho formado neste período denomina-se lenho, ou madeira de Primavera (ver Figura 3.9), podendo também ser designado por lenho inicial. No

fim do período de crescimento, em Portugal corresponde ao início do Outono, há uma diminuição das condições ambientais favoráveis à formação de lenho, conduzindo à paragem, ou abrandamento do crescimento do lenho. Ao lenho formado neste período designa-se por lenho, ou madeira de Verão, ou lenho final (ver Figura 3.9). A madeira dessa camada possui uma cor mais escura, apresenta as paredes celulares mais espessas e um menor calibre dos elementos vasculares.

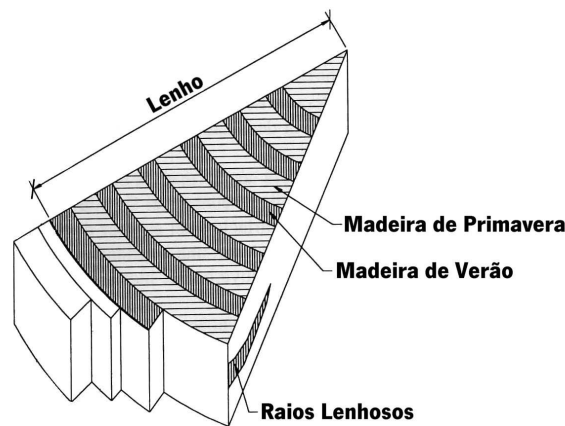


Figura 3.9 - Madeira de Primavera e madeira de Verão [3.07].

As diferenças de cor entre o lenho de Primavera e o de Verão, fazem com que exista uma separação visual das camadas concêntricas, sendo relativamente simples identificar a idade da árvore através da contagem dos anéis de crescimento, desde que estes sejam observados no plano transversal [3.01]. Cada ano corresponde ao conjunto formado pelo anel do lenho de Primavera e de Verão. Este tipo de identificação não é possível em árvores localizadas em regiões tropicais, uma vez que estas possuem condições climáticas favoráveis durante todo o ano, o crescimento das camadas de lenho é constante, não se conseguindo assim diferenciar os anéis de crescimento. Nos casos em que os anéis são identificáveis estes não correspondem a um ano [3.03]. Nas árvores resinosas e folhosas de anéis porosos, existe uma relação inversa entre a largura do anel e a densidade, quanto maior for a largura do anel menor é a densidade e, vice-versa [3.01 , 3.03].

### 3.6 Estrutura Microscópica da Madeira

A madeira, tal como todos os tecidos vivos, é constituída por células que apenas podem ser identificadas com recurso a um microscópio. As células consistem em pequenas unidades que



se dispõem de uma forma justaposta, formando conjuntos que constituem os tecidos. Podem possuir várias funções, como o transporte de substâncias nutritivas e de água, armazenamento de nutrientes, protecção, elaboração e transformação química das substâncias [3.01]. As células responsáveis pelo transporte de nutrientes encontram-se dispostas longitudinalmente ao eixo do tronco, sendo ocas no seu interior para permitir a passagem do fluxo. Os nutrientes captados pelas raízes têm que ser conduzidos até às folhas, fluindo dentro das fibras que se encontram justapostas, designando-se estas por traqueídeos [3.03].

A função de armazenamento, elaboração e transformação química de nutrientes, está assegurada por células de parênquima, dispondo-se longitudinalmente e radialmente. Estas são extremamente importantes para garantir a sobrevivência das árvores após desfolhadas intensas provocadas por agentes atmosféricos, ou pelo homem, ou devido aos incêndios, ou a ataques biológicos, fornecendo a energia necessária que possuem armazenada para reconstituir o aparelho fotossintetizador [3.03].

A função de suporte é assegurada pela parede celular das células, conferindo rigidez à estrutura, quanto mais espessa for a parede maior é a sua capacidade de suporte. Para permitir o acesso dos nutrientes em todas as suas camadas activas, a ligação entre as células dispostas longitudinalmente e, transversalmente, é assegurada pelos raios lenhosos. Estes, permitem a circulação de nutrientes entre as diversas camadas de uma forma simples e eficaz.

### **3.6.1 Estrutura Microscópica de Resinosas**

A madeira de resinosas possui uma estrutura interna mais simples e, mais uniforme, do que as folhosas. É constituída por traqueídeos e parênquima, em que os traqueídeos acumulam a função de transporte de nutrientes com a de suporte da árvore (estrutura homoxilada) [3.01 ; 3.02]. O lenho na sua maioria é constituído por traqueídeos dispostos longitudinalmente, possuindo aberturas denominadas por pontuações, com a função de permitir a troca de nutrientes entre células de diversas camadas.

As células de parênquima dispõem-se segundo raios lenhosos, canais em que a seiva circula transversalmente ao eixo do tronco, abastecendo diversas camadas. Quanto maior for o número de raios lenhosos existentes na madeira, menores serão as retracções sofridas devido à

humidade [3.03]. Estes, contribuem para um contraventamento dos traqueídeos, fortalecendo a estabilidade da estrutura de suporte.

As resinosas podem apresentar canais secretores, responsáveis pela produção e transporte de resina, consistindo em cavidades longitudinais rodeadas por células de parênquima. Podem surgir naturalmente na formação do lenho, ou em consequência, ou como forma de resposta a alguns traumatismos a que a árvore tenha sido sujeita, sendo designados nessa situação como canais traumáticos [3.01].

Na Figura 3.10 pode-se observar uma imagem vista ao microscópio da secção transversal de um tronco de pinheiro bravo, sendo visíveis os diversos constituintes anatómicos. Na Figura 3.11 apresenta-se um esquema tridimensional da estrutura microscópica de uma árvore resinosa.

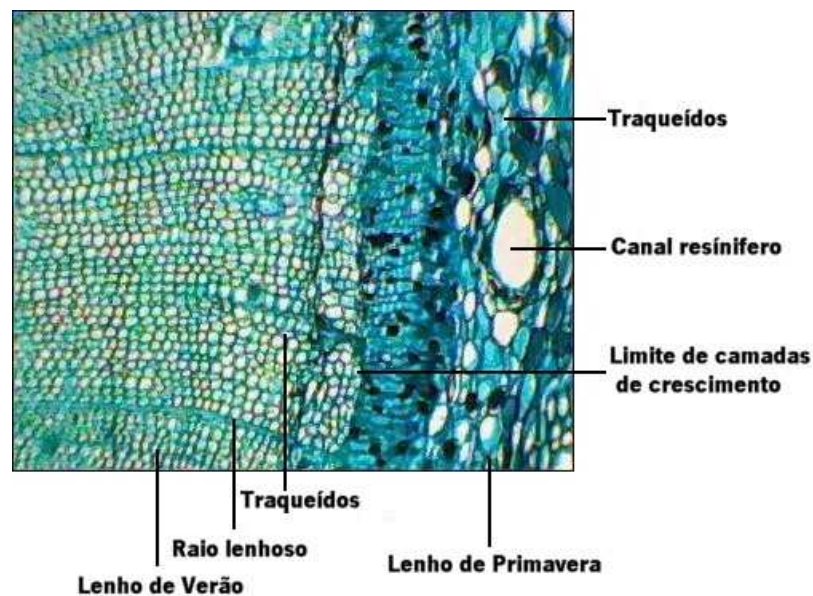


Figura 3.10 - Imagem da secção transversal do tronco de pinheiro bravo vista ao microscópio.

Por vezes, os raios lenhosos também integram os raios traqueídeos transversais, ou canais de resina, em indivíduos que os possuem verticais. Os traqueídeos radiais transportam as reservas de nutrientes armazenados nas células de parênquima, garantindo o acesso dos nutrientes às diversas partes da árvore através de pontuações que existem nas paredes destes. As células de parênquima longitudinal existem em menor quantidade que as de parênquima radial, e encontram-se dispersas ao longo da secção transversal da madeira.

Pode-se comprovar percentualmente a estrutura homoxilada das coníferas, constatando-se que aproximadamente 93 % da constituição do seu lenho corresponde a traqueídeos longitudinais, 6 % a raios lenhosos e, aproximadamente 1 % a canais de resina, isto para a espécie *Pinus Strobus* L. mas sendo representante da sua classe botânica [3.03].

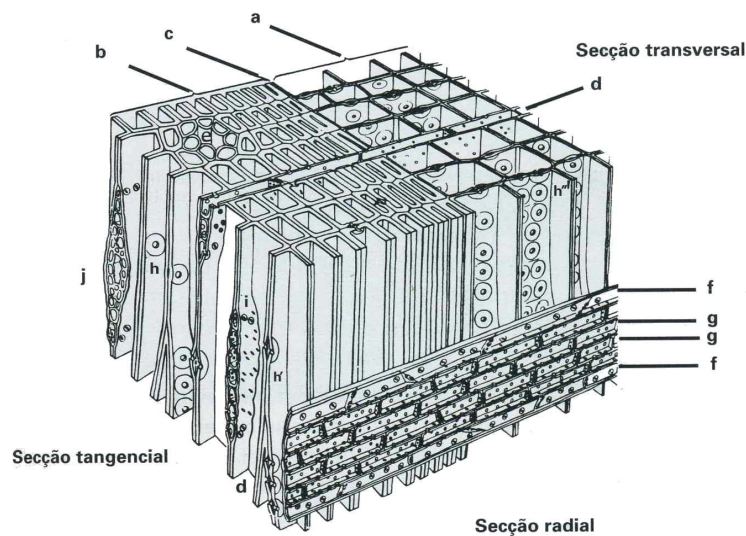


Figura 3.11 - Estrutura microscópica de uma árvore resinosa: a) lenho inicial ; b) lenho final ; c) limite das camadas de crescimento ; d) raio lenhoso unisseriado (secção transversal) ; e) canal de resina vertical ; f) traqueídeos radiais ; g) células de parênquima ; h) pontuação areolada ; h') pormenor do corte tangencial de pontuação areolada ; h'') pontuações areoladas bisseriadas ; i) pontuações de campo de cruzamento ; j) raio lenhoso fusiforme com canal de resina horizontal [3.03].

### 3.6.2 Estrutura Microscópica de Folhosas

Comprovando a evolução das espécies botânicas, as dicotiledóneas desenvolvem-se possuindo uma estrutura interna mais complexa e distinta das coníferas, designando-se por estrutura heteroxilada [3.03]. Esta estrutura caracteriza-se por possuir maioritariamente dois tipos de elementos: os vasos condutores e as fibras lenhosas. Os vasos lenhosos, possuindo maior diâmetro, asseguram a função de transporte de seiva, enquanto que as fibras lenhosas executam a função de suporte. As fibras lenhosas dispõem-se longitudinalmente em redor dos vasos condutores e, como características físicas possuem as extremidades completamente fechadas, sendo constituídas por células abundantes em lenhina. Estas também podem ser designadas por traqueídeos, fibrotraqueídeos ou fibras libriformes [3.01].

A estrutura interna do lenho também pode ser dividida em duas partes, a parte interna e a parte externa. A parte interna do lenho é constituída por vasos condutores, fibras lenhosas e

parênquima, sendo a parte externa constituída por células alongadas, justapostas por topos fechados, comunicando com o interior através de orifícios transversais. As células de parênquima presentes na parte interna encontram-se dispostas longitudinalmente e em grande número, apresentando-se no arranjo espacial de uma forma muito específica. Os raios lenhosos, pertencentes à parte interna, são quase exclusivamente constituídos por células de parênquima, sendo maiores nas folhosas do que nas resinosas, na maioria das situações podem chegar aos 5 cm de altura e, 400  $\mu\text{m}$  de largura [3.03].

Tal como nas coníferas, também nas dicotiledóneas é possível caracterizar-se o lenho através da observação visual dos 3 planos fundamentais da arquitectura do lenho. No plano transversal são visíveis as camadas de crescimento (anéis anuais), os vasos condutores, células de parênquima, raios lenhosos, podendo estes últimos também ser encontrados no plano transversal (ver Figuras 3.12 e 3.13). Por vezes, podem também ser encontrados depósitos gomosos característicos e inclusões de floema.

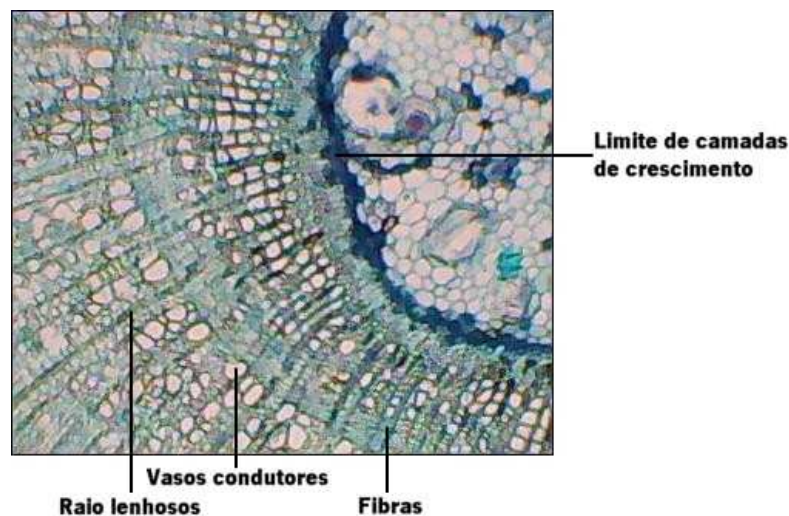


Figura 3.12 - Imagem da secção transversal do tronco de uma árvore folhosa vista ao microscópio.

No plano longitudinal não existe informação relevante a não ser a observação das fibras e dos vasos.

A informação que se obtém da observação dos poros do lenho no plano transversal, entenda-se poros como sendo o seccionamento recto dos vasos no plano em estudo, deve ser utilizada para se definir qual o tipo de porosidade, qual a forma dos poros, qual a disposição dos poros no

lenho, qual o tamanho dos poros, qual a proporção relativa e, se existe obstrução ou oclusão. As células de parênquima podem ser analisadas como estando articuladas com os poros, ou como em algumas situações, em que estas se encontram totalmente demarcadas deles. Uma caracterização cuidada dos raios lenhosos permite prever o comportamento da madeira na coesão transversal, salientando-se a importância do seu tamanho (largura e altura) e, distinção relativamente à densidade ( n. ° / cm tangencial).

Tem particular importância a caracterização dos depósitos gomosos, na medida em que estes afectam a recepção de produtos de acabamento e, impedem a recepção de produtos de preservação. Relativamente à inclusão de floema, não são conhecidas consequências relevantes para a madeira, sendo a sua análise considerada pouco importante.

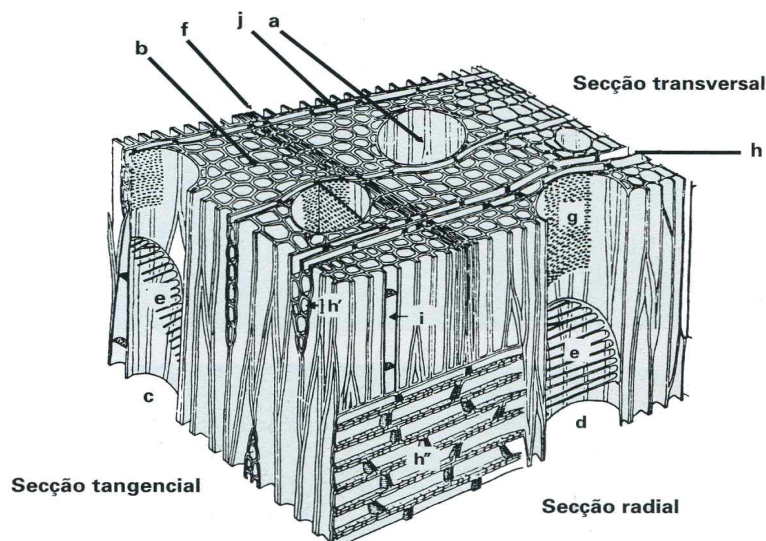


Figura 3.13 - Estrutura microscópica de uma árvore folhosa: a) vaso; b) fibra; c) segmento vascular (secção tangencial); d) segmento vascular (secção radial); e) perfuração escalariforme; f) limite de camadas de crescimento; g) pontuações radio-vasculares; h) raio lenhoso bisseriado (secção transversal); h') raio lenhoso bisseriado (secção tangencial); h'') raio lenhoso (secção radial); i) parênquima axial; j) raio lenhoso unisseriado [3.03].

Para além do que já foi referido, a caracterização do tamanho e a disposição dos vasos no plano transversal, definem a porosidade da madeira, podendo esta ser difusa, semi-difusa ou em anel (ver Figura 3.14). A porosidade difusa consiste numa distribuição uniforme dos vasos possuindo diâmetros semelhantes. A porosidade em anel é caracterizada por uma distribuição diferenciada dos poros entre a madeira de Primavera e, a madeira de Verão, havendo uma concentração dos poros no lenho de Primavera, sendo estes de maior calibre [3.03 , 3.05]. As situações



intermédias entre estes dois tipos de porosidade apresentados, definem-se como porosidade semi-difusa ou intermédia. Segundo alguns autores, pode-se definir como porosidade semi-difusa as situações que exista uma transição gradual do calibre dos vasos entre a zona de Primavera e a de Verão, demarcando-se da porosidade em anel em que a transição é brusca [3.03].

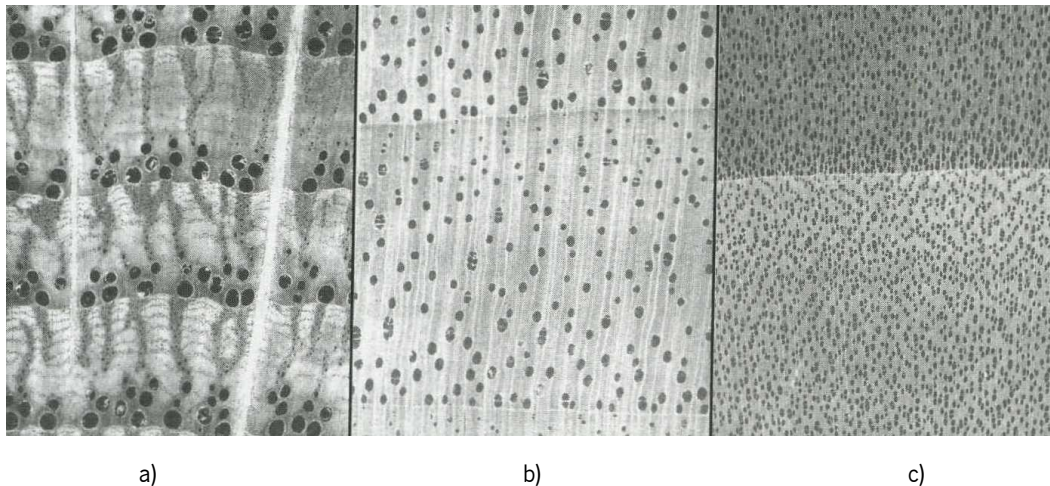


Figura 3.14 - Tipos de porosidade em folhosas: a) em anel ; b) semi-difusa ; c) difusa [3.05].

### 3.7 Estrutura Sub-Microscópica da Madeira

Realizando-se uma análise microscópica a um elemento de madeira, qualquer que seja, pode-se constatar que a madeira se decompõe em estruturas elementares, as células. Estas unidades fundamentais das árvores, são constituídas por paredes no seu interior contendo três moléculas complexas: celulose, hemicelulose e lenhina. O arranjo espacial destas moléculas, isto é, a forma como se ligam e como estão orientadas, afecta a capacidade resistente da árvore em relação ao seu próprio peso [3.04]. Os componentes mais básicos da celulose nas paredes celulares são as microfibrilas, e estas por sua vez, fixam-se à hemicelulose. A estrutura interna celular é muito importante para se conseguir averiguar a susceptibilidade da madeira aos ataques biológicos, dependendo da constituição das paredes celulares e da forma como as moléculas se ligam umas às outras [3.04]. Conforme for a disposição molecular a madeira estará melhor ou pior protegida contra os agentes agressores. Os ataques biológicos têm como objectivo a utilização da madeira como fonte de alimento, proporcionando aos agentes as moléculas que estes assimilam, celulose e lenhina.

A constituição das paredes celulares divide-se em: parede primária e parede secundária. A

parede primária é a primeira protecção da célula, separando a célula do meio que a rodeia, a lamela média (material sem celulose e rico em lenhina que envolve as células). Apresenta uma espessura reduzida, 0,1 a 0,2  $\mu\text{m}$ , sendo constituída por microfibrilas, que se encontram sem uma orientação definida. É a primeira parede a ser formada, em que com a sua organização controla a expansão da célula jovem.

A parede secundária é formada por três camadas:

- camada externa;
- camada média;
- camada interna.

A camada externa, também designada por  $S_1$ , consiste na camada contígua à parede primária, sendo por isso a camada mais externa da parede secundária. Normalmente não se consegue diferenciar ao microscópio esta camada da parede primária. Na camada  $S_1$  as microfibrilas encontram-se orientadas segundo espirais, quer para a esquerda, quer para a direita, fazendo um ângulo que varia entre os 50 e os 70 ° em relação ao eixo da célula [3.04]. A sua espessura varia de 0,1 a 0,35  $\mu\text{m}$ . Esta camada é responsável por garantir o bom desempenho em tracção transversal, sendo comum estar impregnada de lenhina. A camada média, também designada por  $S_2$ , é a camada mais espessa da parede celular, 1 a 10  $\mu\text{m}$ , encontrando-se as microfibrilas (constituídas por celulose densa) muito juntas, dispostas em hélices paralelas formando um ângulo de 5 a 30 ° em relação ao eixo da célula. Esta camada representa cerca de 75 a 85 % da espessura total da parede celular [3.04]. A camada interna, também designada por  $S_3$ , delimita a cavidade celular ou lúmen, sendo também uma camada muito fina, variando a sua espessura entre os 0,5 e os 1,1  $\mu\text{m}$ . É constituída por lamelas em que as microfibrilas formam um ângulo de 60 a 90 ° em relação ao eixo da célula [3.04]. Conforme já foi dito anteriormente, todas as células são ligadas através de uma lamela média, sendo composta quase na totalidade por lenhina. Na Figura 3.15, podem-se observar as diversas camadas que constituem a estrutura da parede celular da madeira.

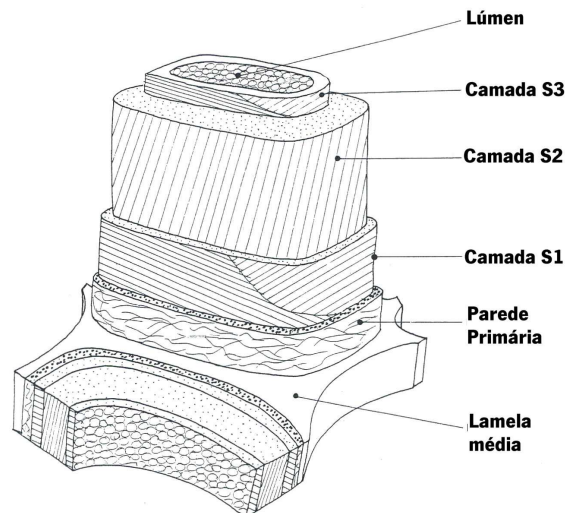


Figura 3.15 - Estrutura da parede celular [3.04].

A disposição das microfibrilas nas camadas da parede secundária afecta as propriedades de expansão da madeira húmida. A predominância de microfibrilas orientadas paralelamente ao eixo longitudinal, restringe a expansão na mesma direcção na madeira juvenil [3,03].

Com esta breve descrição da estrutura celular, dá-se a conhecer o funcionamento básico da unidade mais elementar da árvore, e por sua vez da madeira. O domínio dos processos dos mecanismos celulares, permitirá compreender o processamento dos ataques biológicos e, os danos associados.

### 3.8 Caracterização da Madeira Segundo os Planos Radial e Tangencial

Os elementos de madeira na sua grande maioria, resultam do corte radial ou tangencial de um tronco de madeira, efectuados com base na observação de determinadas características próprias de cada espécie de madeira. Quanto mais detalhada for a análise da caracterização da madeira segundo os planos radial e tangencial, maior é facilidade de se conseguir identificar a espécie de madeira em estudo. Nas situações em que a identificação não é possível, é necessário recorrer-se à observação com o auxílio do microscópio electrónico, ou de outros tipos de equipamentos.



### **3.8.1 Grão da Madeira**

Uma das formas de se caracterizar a madeira é através do seu grão. O grão corresponde ao tamanho dos elementos fibrosos, quanto maior for o seu diâmetro mais grosseiro será o grão da madeira [3.01]. Entenda-se por elementos fibrosos os traqueídeos no caso das resinosas e, os vasos condutores no caso das folhosas. Existem três tipos de grão: grão fino, grão médio e grão grosso (ou vasto). O grão fino é definido por traqueídeos ou vasos condutores de pequeno diâmetro. O grão médio é definido por traqueídeos ou vasos condutores de diâmetro intermédio e homogêneos, isto é, quase todos os elementos possuem o mesmo diâmetro. O grão grosso ou vasto é definido por ser facilmente visível a olho nu devido às suas grandes dimensões.

### **3.8.2 Textura da Madeira**

A madeira também pode ser caracterizada quanto à sua textura, conseguindo-se observá-la através do plano transversal pela visualização dos anéis de crescimento. Considera-se a textura da madeira como sendo a proporção entre a largura do lenho de Verão e, a largura total anual do anel de crescimento, constituído pelo lenho de Primavera e de Verão [3.03]. A textura será forte quando o lenho de Verão tiver uma largura do anel muito superior à do lenho de Primavera. De uma forma simplista, pode-se entender que a textura da madeira consiste na comparação dos tamanhos dos anéis de crescimento, analisando se a largura do lenho de Primavera difere muito da do lenho de Verão. A madeira pode apresentar textura fraca, média ou forte [3.03].

### **3.8.3 Fio da Madeira**

Outra das características da madeira que pode ser observada é o fio, que consiste no alinhamento que os elementos fibrosos possuem em relação ao eixo do tronco. A caracterização do fio da madeira é extremamente importante, influencia o comportamento do material quando solicitado mecanicamente, ou quando sujeito a deformações motivadas pela retracção de secagem, originando desvios na transmissão das acções solicitadas [3.03]. O fio direito ou recto, é uma raridade nos elementos de madeira, sendo comum que o material apresente o fio um pouco inclinado. De uma forma geral, a grande maioria das espécies resinosas apresenta o fio direito, enquanto que as folhosas apresentam uma grande variedade de orientações do seu fio.

### **3.8.4 Veio da Madeira**

O veio da madeira é uma das propriedades mais específicas, ao caracterizar-se correctamente

o tipo de veio da madeira, identifica-se um conjunto de possíveis espécies de madeira , em que uma delas será a do elemento em estudo. O veio da madeira segundo Carvalho [3.03], define-se pelo *“conjunto de todos os efeitos observáveis nas faces das tábuas, folhas desenroladas (contraplacados) e de corte plano (folheados), qualquer que seja a causa responsável, nomeadamente arranjo e direcção dos elementos fibrosos (fio), colorações sazonais ou acasos de brilho, inclusive devidas ao grafismo resultante do seccionamento das camadas de crescimento, ou seja da sua largura, intensidade do grão e heterogeneidade, bem como nitidez do lenho final ou da intensidade da textura”* [3.03].

Posto isto, com uma simples análise visual de uma secção de madeira, conseguimos classificá-la quanto ao seu veio, podendo este ser caracterizado por três situações distintas:

- veio sobretudo dependente da espessura e nitidez das camadas de crescimento;
- veio sobretudo dependente do fio, do grão e da textura da madeira;
- veio sobretudo dependente de desiguais tonalidades e brilhos da madeira.

### **3.9 Composição Química**

As árvores, tal como todas as plantas, produzem açúcares para serem consumidos e para serem incorporados na sua estrutura celular. A produção de açúcar (hidratos de carbono) ocorre com a reacção do dióxido de carbono, água e sais minerais do solo. Este processo é desencadeado pela energia solar em conjunto com os pigmentos existentes nas folhas das árvores, designando-se por fotossíntese. Da fotossíntese resultam os hidratos de carbono, água e oxigénio. Os hidratos de carbono produzidos são moléculas de glucose, sendo este um açúcar simples, que constitui a base de formação de outras substâncias.

É muito importante a forma como as moléculas de glucose se dispõem, quando estas se encontram reunidas no mesmo plano dispostas sequencialmente na mesma posição formam o amido [3.04]. O amido é uma substância facilmente sintetizável, fazendo parte dos produtos de armazenamento da planta. Quando as moléculas de glucose encontram-se invertidas de uma forma alternada ao longo da cadeia, forma-se a celulose. Apesar da origem do amido e da celulose ser a mesma, as propriedades de cada elemento são muito diferentes. A celulose é um composto muito estável, sendo formada por longas cadeias de 8000 a 10000 moléculas de

glucose, é insolúvel em água, é incolor e, resistente a esforços de tracção [3.03 ; 3.04]. Fisicamente é definida por ter o aspecto de microfibrilas dispostas de uma forma paralela. A celulose está presente entre 40 a 50 % da constituição da madeira, fortalecendo a estrutura ao ser responsável pela rigidez das paredes celulares [3.05 ; 3.08].

Quando o carbono existente na atmosfera é incorporado no processo de fotossíntese origina uma grande variedade de produtos orgânicos, bem como de açúcar. A partir da mistura de açúcares, a xilose, a manose, a glucose, a galactose e a arabinose, sendo estes os mais frequentes, forma-se outro dos componentes principais da madeira, a hemicelulose. Este componente difere muito pouco entre coníferas e dicotiledóneas. As cadeias das moléculas de hemicelulose são mais curtas que as de celulose e, na maioria das vezes são ramificadas. A hemicelulose corresponde a 20 - 30 % da constituição das resinosas e, 25 - 40 % das folhosas, sendo a principal responsável pela elasticidade e, executando a função de ligante da celulose [3.05 ; 3.08]. Perante substâncias alcalinas degrada-se facilmente.

Para além do que já foi referido, com a fotossíntese também se inicia a produção de uma molécula complexa formada por uma malha tridimensional de três moléculas fenólicas, designada por lenhina. A lenhina é uma componente muito estável e importante para a durabilidade da madeira, é impermeável, insolúvel, e assegura a coesão transversal das fibras, assumindo-se como ligante. As folhosas de uma forma geral possuem menos lenhina (20 - 25 %) do que as resinosas (25 - 30 %), apresentando também diferentes proporções das três moléculas fenólicas, originando que nas folhosas a lenhina seja mais fraca e degradável [3.03].

No total, os três componentes principais da madeira, a celulose, a hemicelulose e a lenhina, correspondem aproximadamente a 97 - 99 % constituição da madeira em zonas temperadas e, 90% em zonas tropicais. A restante percentagem corresponde a substâncias extractivas e a pequenas quantidades de matérias minerais. As substâncias extractivas são substâncias extractáveis pela água, ou por dissolventes neutros orgânicos, tais como: álcool, benzol, éter, acetona, entre outros. Como substâncias extractivas podem-se encontrar: taninos, matérias corantes, óleos essenciais, ceras, gorduras, resinas, saponinas, hidrocarbonetos solúveis, açúcares, entre outros. Estas substâncias não se encontram todas ao mesmo tempo na mesma espécie de madeira, algumas delas são características de determinadas espécies.

As substâncias extractivas localizam-se essencialmente no cerne, sendo a causa principal da cor mais escura, e aumentam a resistência do cerne aos ataques biológicos. Os extractivos podem ter uma grande influência nas propriedades da madeira, nomeadamente na durabilidade, na dureza, no cheiro, na cor, na abrasão, na colagem, ou até mesmo na afinidade para impregnação de tintas e vernizes [3.05]. A constituição química, através da presença de substâncias extractivas específicas leva a que certas espécies sejam resistentes ou susceptíveis aos ataques biológicos.

### **3.10 As Propriedades e Características da Madeira**

#### **3.10.1 Propriedades Físicas**

##### **3.10.1.1 A Água na Sua Constituição**

A água entra na constituição de todos os seres vivos e, a madeira não é excepção. A água pode existir na madeira segundo três formas distintas: água de constituição; água de impregnação e água livre [3.07]. A água de constituição é a água que faz parte da própria constituição da madeira e, sem esta não era possível a existência material da mesma. Só com a destruição total do elemento de madeira é que se consegue eliminar a água de constituição. A água de impregnação é a água existente no interior das paredes celulares e no lúmen das células. Esta água, afecta significativamente as propriedades físico-mecânicas. Com o aumento do teor em água a resistência mecânica diminui, para além de afectar a resistência ao choque e a tenacidade. A eliminação da água de impregnação é obtida por secagem em estufa, a uma temperatura de aproximadamente 103 °C [3.07]. A água livre consiste na água que envolve as cavidades das células, a própria secagem natural, quando a madeira se encontra exposta ao ar, conduz à sua eliminação. Para além da densidade aparente, que é afectada conforme existe mais ou menos água na madeira, mais nenhuma propriedade física e mecânica é afectada pela maior ou menor quantidade de água livre.

##### **3.10.1.2 Teor de Humidade**

A madeira efectua trocas de humidade com o ar, esta troca depende da humidade relativa do ar, da temperatura ambiente e, do teor em água da própria madeira (H). As trocas de humidade reflectem-se nas propriedades do material e, no seu próprio desempenho quando solicitado em diversas situações.

O teor em água da madeira, define-se pela percentagem de água correspondente ao peso da madeira húmida, em relação ao peso da madeira seca em estufa [3.07], de acordo com:.

$$\% H = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100 \quad (3.1)$$

em que,

$P_h$  : Peso do provete de madeira húmida (kg),

$P_s$  : Peso do provete de madeira seca, obtida por secagem em estufa a 103 °C (kg).

Após o abate e corte da árvore, a madeira apresenta um teor em água que varia entre 50 a 110 %, e com secagem ao ar, diminui para valores de 16 a 18 %. Quando submergidas em água, algumas espécies apresentam teores em água muito elevados, na ordem dos 100 a 200 % [3.07]. É comum nas resinosas o teor em água da madeira do borne, ser superior ao da madeira do cerne. Nas folhosas, essa diferença não é notória, exceptuando-se apenas algumas espécies.

Há um determinado valor para o teor em água, a partir do qual, mesmo que esse valor aumente, as propriedades da madeira não são alteradas, designa-se por ponto de saturação das fibras (PSF). Fisicamente, pode ser explicado pela situação em que as paredes celulares estão saturadas de água, sem existir água no lúmen das *células* (ver Figura 3.16) [3.09] O ponto de saturação das fibras normalmente aproxima-se de um teor de humidade de 30 %. A absorção da água ocorre apenas até um determinado valor, correspondente ao teor em água máximo que o material consegue atingir, valor a partir do qual a madeira não consegue reter mais água. Isto verifica-se para a situação em que as paredes celulares e o lúmen das células se encontram saturados de água, ou seja, sobresaturação acima do ponto de saturação das fibras (ver Figura 3.16).



Figura 3.16 – Fases de saturação das fibras: acima do ponto de saturação das fibras ; ponto de saturação das fibras; abaixo do ponto de saturação das fibras; da esquerda para a direita, respectivamente [3.09].

Quando o teor em água se encontra abaixo do ponto de saturação das fibras, as paredes celulares deixam de ter água no seu interior (ver Figura 3.16). Na madeira verde, as paredes celulares encontram-se saturadas de água e, é comum, existir uma quantidade de água adicional no lúmen das células.

#### 3.10.1.3 Higroscopicidade

A higroscopicidade é uma propriedade característica dos materiais que efectuem trocas de humidade com o ar envolvente, absorvendo ou libertando água para a atmosfera, até atingir um equilíbrio, consoante a temperatura e a humidade relativa do ar. A madeira encontra-se constantemente a trocar humidade com o ar, até atingir o equilíbrio, num determinado teor em água, em que a madeira nem absorve nem perde humidade, designando-se por humidade de equilíbrio. A humidade de equilíbrio pode ser determinada através da consulta das curvas de humidade de equilíbrio da madeira (ver Figura 3.17), sendo as mesmas constantes para quase todas as espécies de madeira, fazendo-se uma leitura simples através da introdução da humidade relativa do ar (%), e da temperatura ambiente (°C) [3.09]. Existem produtos no mercado para minimizar as trocas de humidade com o ar envolvente, mas estes não as conseguem eliminar, apenas as retardam, como é o caso das ceras, dos vernizes e das tintas. As madeiras ao serem utilizadas, devem possuir um teor de humidade o mais próximo possível da humidade de equilíbrio para as condições higrotérmicas do local onde o material será aplicado. Em seguida, podem-se consultar na Tabela 3.1, os teores de humidade aconselhados para algumas utilizações [3.07].

Tabela 3.1- Teores em Água Aconselhados de Acordo com a Utilização da Madeira [3.07].

Utilização	Teor de humidade aconselhado (%)
Obras Hidráulicas	30
Ambientes muito húmidos	25-30
Exposição à humidade (que não sejam coberturas)	18-25
Obras cobertas com aberturas	16-20
Obras cobertas e fechadas	13-17
Locais fechados e aquecidos	12-14
Locais com aquecimento contínuo	10-12

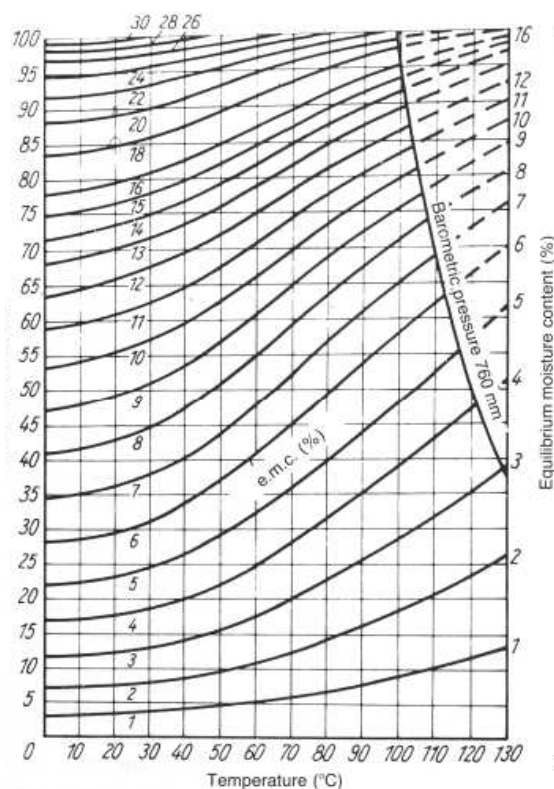


Figura 3.17 - Curvas de humidade de equilíbrio [3.07].

Os termos que se empregam relativamente à madeira podem ter bastante utilidade, principalmente na compra de madeira. Na maioria das vezes o material encontra-se referenciado de acordo com o teor em água que possui, como por exemplo madeira seca, madeira verde, madeira saturada, entre outros. A classificação da madeira de acordo com o seu teor em água, pode ser consultada na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Classificação da Madeira de Acordo com o seu Teor em Água [3.07].

Classe	Teor de água (%)	Comentários	
Madeira saturada	> 70	Madeira durante longo tempo imersa em água.	
Madeira verde	PSF - 70	Madeira em pé, ou de corte recente.	
Madeira semi-seca	23 - PSF	Madeira serrada em verde. Madeiras em ambientes muito húmidos e/ou frequentemente expostas à chuva.	
Madeira seca	18 - 23	Madeira seca (fora do risco de alteração cromática).	Construções não cobertas ou cobertas mas muito expostas (hangares por exemplo).
Madeira seca ao ar	13 - 18	Inverno: 16-18 Primavera/Outono: 14-16 Verão: 12-14	

Madeira dissecada	0 - 13	Interiores. Ambientes aquecidos.
Madeira completamente seca	0	Estabilizada em peso a 103°C. Não é possível de manter em condições ambientes pois a madeira absorverá água do ar.

#### 3.10.1.4 Retracção e Dilatação

É importante prever-se o comportamento que um determinado material irá apresentar com o seu desempenho, ao longo da sua vida útil. De todos os materiais de construção que existem, a madeira é um dos que necessita de maior caracterização do meio onde irá ser aplicada, de forma a prever-se o seu comportamento em funcionamento. A negligência dessa caracterização leva ao aparecimento de diversos danos, cujo desconhecimento transformou o facto indesejável numa situação comum no universo das madeiras. Para se utilizar a madeira de uma forma adequada às funções a desempenhar, deve-se compreender os fenómenos que a seguir se apresentam.

A madeira é dimensionalmente estável quando o teor em água é superior ao ponto de saturação das fibras. As variações dimensionais, ocorrem para valores abaixo do ponto de saturação das fibras, em situações em que a madeira perde ou absorve água [3.10]. Quando a madeira liberta água, devido à secagem, as dimensões reduzem-se, diminuindo a presença de água no interior das paredes celulares, designando-se este fenómeno por retracção. Encontrando-se a madeira já seca, esta começa a absorver humidade, voltando a dilatar proporcionalmente à humidade absorvida [3.11], acontecendo assim o fenómeno de dilatação ou inchamento. A retracção, corresponde assim, à situação em que o material perde água das suas paredes celulares, originando empenamento, fendilhação, soltando ligações, espaços vazios (caso do soalho). Esta situação pode ocorrer apenas na superfície da madeira, em que o elemento sofre retracção devido à perda de humidade, mas no interior a madeira pode-se encontrar bastante húmida [3.05]. A dilatação, induz a um aumento de esforços, que podem originar danos graves.

A madeira como material anisotrópico, apresenta retracções diferentes de acordo com a direcção das fibras. A retracção é maior no plano tangencial, enquanto que no plano radial é metade do valor do plano tangencial. No plano longitudinal a retracção não é relevante, visto ser muito inferior aos outros dois planos (aproximadamente 20 vezes) [3.05]. No estado verde a retracção tangencial varia de 5 a 10 % da dimensão, conforme as espécies, a retracção radial de



2,5 a 5 % e, a retracção longitudinal de 0,1 a 0,3 % [3.08]. Apesar dos baixos valores de retracção longitudinal, existem espécies que apresentam uma retracção longitudinal elevada. Uma maior retracção longitudinal também pode ocorrer, quando se possui madeira de reacção, ou madeira próxima do centro do tronco (madeira juvenil), ou da madeira de fio cruzado. Em geral, a retracção elevada está associada a uma grande densidade. As dimensões da secção das peças das estruturas ou dos revestimentos, também afectam a retracção, bem como a duração da secagem. Estas espécies devem ser evitadas quando a estabilidade dimensional longitudinal é importante.

Apesar de ser bastante imprevisível o comportamento face à humidade, a retracção pode ser estimada tendo em conta a espécie de madeira e o ambiente a que está exposta, fornecendo assim valores de referência. Esses valores, são obtidos através da retracção total que a madeira verde pode atingir até se encontrar totalmente seca. A título de exemplo, a madeira de sucupira pode apresentar uma retracção tangencial de 7 % [3.10].

Para se evitar a retracção e a dilatação podem tomar-se os seguintes cuidados [3.11]:

- devem ser aplicadas madeiras que apresentem uma retracção reduzida;
- o corte das peças deve ser radial;
- as superfícies das peças devem ser impermeabilizadas com vernizes ou pinturas;
- a madeira aplicada deve possuir um teor de humidade próximo da humidade de equilíbrio, do local onde será utilizada.
- devem ser dimensionadas juntas apropriadas aos possíveis movimentos que o material irá sofrer;
- devem ser cumpridas normas e boas regras de construção em madeira, com especial cuidado nos pormenores construtivos.

Posto isto, com todas as limitações que estes fenómenos possam apresentar, é sempre possível minimizar as consequências resultantes, sendo apenas necessário que os utilizadores pensem com que finalidade a madeira será aplicada e, qual a espécie de madeira mais adequada.

### 3.10.1.5 Densidade e Densidade relativa

Uma das propriedades físicas mais importantes é a densidade, influenciando significativamente outras propriedades, tais como, a higroscopicidade, a resistência, a retracção e a expansão, as propriedades acústicas, as propriedades eléctricas e, a forma de processamento industrial do próprio material.

A densidade, ou massa volúmica, traduz-se na relação entre a massa e o volume do elemento, de acordo com a seguinte expressão:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.2)$$

em que,

$\rho$ : densidade (kg / m<sup>3</sup>),

$m$ : massa do elemento (kg),

$V$ : volume do elemento (m<sup>3</sup>).

Como forma de se estabelecer um critério uniforme para a comparação de densidades, referenciou-se que a densidade deverá obter-se para um teor de humidade de 12 %, consistindo no teor de humidade de referência [3.07].

A densidade relativa (specific gravity, na literatura inglesa), caracteriza-se por ser uma propriedade adimensional, que relaciona a densidade de um elemento com a densidade da água a uma temperatura de 4° C (1 g / cm<sup>3</sup>) [3.13], de acordo com a seguinte expressão:

$$\rho_r = \frac{\rho}{\rho_{\text{água}}} \quad (3.3)$$

em que,

$\rho_r$ : densidade relativa,

$\rho$ : densidade do elemento (kg / m<sup>3</sup>),

$\rho_{\text{água}}$ : densidade da água a uma temperatura de 4 °C em volume do elemento (kg / m<sup>3</sup>)

A densidade varia muito entre espécies e, até mesmo entre indivíduos da mesma espécie pode variar um pouco quando existe madeira de reacção. A densidade pode apresentar valores de 300,00 kg / m<sup>3</sup> (caso da balsa), até 1300,00 kg / m<sup>3</sup> (caso da *lignum vitae*) [3.09 ; 3.13].

A densidade da madeira de árvores resinosas normalmente varia entre 400 a 550 kg / m<sup>3</sup>, enquanto que a densidade da madeira de árvores folhosas possui valores um pouco mais elevados, entre 600 a 700 kg / m<sup>3</sup> (em média) [3.09].

Apesar das diferenças entre folhosas e resinosas, ao analisarmos apenas a estrutura celular de cada uma das classes botânicas, pode-se constatar que a densidade da parede celular é igual para ambas as classes, correspondendo a 1,50 g / cm<sup>3</sup> [3.13]. Como a densidade depende da massa da madeira, esta propriedade irá assim depender sempre do teor de humidade, que conforme a variação deste último também a densidade variará. Para cada aumento de 1 % do teor de humidade, a densidade aumenta 0,5 %, sendo esta variação linear até aproximadamente 25 a 30 % do teor de humidade [3.13]. Portanto, quanto maior for o teor de humidade maior será a densidade.

A nível químico, a madeira apresenta um fenómeno próprio, a quantidade de substâncias extractivas relaciona-se directamente com a densidade, isto é, quanto maior for a quantidade de substâncias extractivas, maior é a densidade [3.13].

A densidade pode determinar-se segundo alguns processos:

- determinação através do relacionamento da massa do provete de madeira seco em estufa com o volume do provete;
- determinação através de microdensitometria de raios-x;
- determinação através de correlações com valores fornecidos pelo resistografo, ou pilodyn, entre outros.

Para se concluir os esclarecimentos acerca da densidade, é relevante referir-se a importância que esta propriedade apresenta para a trabalhabilidade da madeira, ou seja, o valor da densidade de uma determinada espécie de madeira, quando em comparação com outras, consegue-nos esclarecer acerca de qual a espécie com melhor trabalhabilidade. A

trabalhabilidade é maior quanto menor for a densidade do material. Este facto é muito importante para a indústria, nomeadamente em certas actividades que requerem madeiras mais trabalháveis, devido à dificuldade da execução de alguns tipos de trabalhos [3.10].

#### 3.10.1.6 Durabilidade

É questionável a aplicação de madeira em algumas aplicações devido à sua perenidade, e à susceptibilidade que o material apresenta aos ataques biológicos e não-biológicos. É claro, que o material apresenta um comportamento diferente dependendo da espécie, e dependendo das condições do meio envolvente a que vai estar exposto aquando da sua utilização. Tal como, para outras propriedades, a espécie de madeira deve ser adequada à sua utilização, para assim, se conseguir otimizar o tempo de vida do material, em boas condições de funcionamento. Define-se assim durabilidade, como a resistência que a madeira apresenta à degradação por fungos, e diversos xilófagos (insectos sociais, insectos de ciclo larvar e xilófagos marinhos), e de se manter em boas condições de funcionamento quer estéticas, quer estruturais, perdurando ao longo do tempo. Ou seja, entendem-se como espécies duráveis as madeiras que oferecem uma maior resistência aos ataques biológicos, garantindo assim, um maior tempo de vida em boas condições de utilização. Ao contrário, as madeiras pouco duráveis são muito susceptíveis aos ataques biológicos, sendo quase certo a sua degradação se as condições de temperatura e de humidade, forem favoráveis ao desenvolvimento de agentes agressivos, necessitam de tratamentos preventivos para colmatarem a baixa resistência natural que apresentam.

Mesmo as madeiras mais brandas podem apresentar uma boa resistência ao apodrecimento, basta que se garanta um ambiente seco. A madeira constantemente em ambiente seco é muito resistente à degradação, sendo pouco provável que a mesma ocorra. Até mesmo a madeira permanentemente submersa em água, não se degrada significativamente. Os factores ambientais que despoletam a degradação são a temperatura, e o teor de humidade. As madeiras deterioram-se mais facilmente em ambientes quentes e húmidos, do que em ambientes frios e secos [3.10]. Os locais de altitude elevada também inibem o apodrecimento da madeira, não ocorrendo a proliferação de fungos devido às baixas temperaturas.

Apesar da degradação biológica a que a madeira está sujeita, esta também apresenta alguma resistência natural ao apodrecimento, característica definida através da sua própria constituição. A madeira do borne é mais propícia à degradação do que a madeira cerneira, possuindo

nutrientes e uma menor quantidade de lenhina, que origina uma maior vulnerabilidade aos agentes agressivos. A madeira do cerne é mais durável, apresenta uma resistência considerável ao apodrecimento, dependendo das espécies, mas de uma forma geral, todas as espécies apresentam um cerne resistente à degradação. Esta defesa natural explica-se através da presença de substâncias extractivas, tóxicas aos agentes biológicos e, também, à maior quantidade de lenhina que torna a madeira mais dura e por isso menos apetecível de ser atacada pelos organismos biológicos.

Mesmo quando algumas espécies apresentam um cerne com boa resistência ao apodrecimento, quando os riscos de exposição aos agentes agressivos são muito elevados, e também, quando a probabilidade de estes ocorrerem é muito grande, é conveniente aplicar-se um tratamento preventivo nos elementos de madeira. Por vezes, quando as espécies têm uma resistência aos ataques biológicos muito elevada, é suficiente após o abate e corte da árvore, a imersão num produto preservativo. Nas situações em que o risco de apodrecimento é muito elevado, e a madeira não apresenta uma boa durabilidade, é apropriado o tratamento por pressão.

#### 3.10.1.7 Propriedades Térmicas

Actualmente, com a nova regulamentação térmica, as questões relacionadas com o comportamento térmico assumiram um papel permanente e importante, numa progressão a caminho de um desenvolvimento sustentável. Com todas as exigências relativas a um melhor conforto térmico e a uma melhor eficiência energética, a madeira surge como um material de construção que se enquadra nas exigências. É um material apto a substituir outros materiais que habitualmente caracterizam as soluções construtivas comuns, como é o caso das paredes em alvenaria de tijolo furado (por exemplo). Para além de ser um material natural (é ecológico), a madeira é um bom isolante térmico, apresentando coeficientes de transmissão térmica inferiores a outros materiais (betão, pedra, tijolo, vidro). Quando utilizada em paredes exteriores, com uma menor espessura de parede, consegue-se obter o mesmo desempenho ou até melhor do que materiais que necessitam de mais espessura e, que são utilizados na construção convencional. A título de exemplo, o tijolo cerâmico apresenta uma condutibilidade térmica na ordem dos 0,60 W/m. °C, enquanto que a madeira apresenta um valor de 0,18 W/m. °C (para folhosas semi-densas). Isto quer dizer, que a madeira tem uma maior resistência térmica do que o tijolo, aproximadamente o triplo do valor. Possivelmente esta é uma das razões, para além de

outras relacionadas com a disponibilidade do material na natureza, pela qual nos países do norte da Europa se constrói muito em madeira.

A condutibilidade térmica é afectada pela densidade, teor de humidade, conteúdos extractivos, direcção do grão e irregularidades estruturais, quanto maiores forem estes factores, maior é a condutibilidade térmica. Os valores da condutibilidade térmica são semelhantes quer para o plano radial como tangencial, diferindo apenas para o plano tangencial, que apresenta quase o dobro do valor dos outros planos [3.10].

Ao compararmos a madeira com outros materiais, consegue-se facilmente caracterizá-la como um material que apresenta uma temperatura constante, nas situações em que o ambiente interior se encontra quente o material não aquece e, nas situações em que o ambiente interior se encontra frio o material não arrefece [3.12].

Perante as variações de temperatura, pode expandir ou diminuir as suas dimensões, de acordo com as variações do teor em água. A variação das dimensões face às flutuações de temperatura é definida pelo coeficiente de expansão térmica. Este coeficiente apresenta valores tão baixos, que praticamente se considera desprezável a contribuição da temperatura para a dilatação da madeira [3.12].

#### 3.10.1.8 Propriedades Acústicas

Não é correcto dizer-se que a madeira é um bom isolante acústico, sendo necessário cumprir-se com dois requisitos para um determinado material possuir um bom comportamento acústico, a absorção sonora e o isolamento sonoro. A madeira apenas cumpre com um dos requisitos, a absorção sonora, tendo a capacidade de absorver o som, devido a ser constituída por uma estrutura interna de vasos, ocos existentes no seu interior, que amortecem as ondas sonoras transformando a energia sonora em energia calorífica. Assim, quando utilizada em edifícios habitacionais, tem a capacidade de amortecer as vibrações sonoras [3.07 ; 3,09].

O facto de ter menor densidade do que outros materiais, faz com que o seu desempenho em termos de isolamento acústico não seja o ideal.

### 3.10.1.9 Propriedades Eléctricas

Quando se encontra no estado anidro, a madeira possui boas características para isolante eléctrico, facto que se altera com o aumento do teor em água. Aumentando o teor em água diminui a resistência eléctrica. No estado anidro, à temperatura ambiente, a resistência eléctrica é de  $10^{16}$  ohm / m e, no estado verde é de  $10^{14}$  ohm / m [3.07]. Os diferentes valores de resistência eléctrica conforme o teor de humidade presente na madeira, são a base do funcionamento dos higrómetros (aparelhos que medem o teor em água).

### 3.10.1.10 Resistência ao fogo

Um incêndio pode ser caracterizado por duas fases distintas, uma primeira que corresponde ao despoletar do mesmo e ao seu desenvolvimento inicial, e uma segunda relacionada com a sua propagação, com a sua continuidade [3.07]. Para a primeira fase é importante caracterizar a facilidade com os materiais se inflamam, ou seja, a facilidade de ignição de um incêndio e o aumento da chama à superfície dos próprios materiais. Corresponde assim ao comportamento do material ao fogo.

Para a fase de continuidade é importante a combustibilidade dos materiais, sendo que os materiais combustíveis aumentam a carga de incêndio. Esta fase está associada à resistência ao fogo que os materiais oferecem, como elementos construtivos. Para se classificar a reacção dos materiais ao fogo existem 5 classes [3.07]:

- M0 : Não é combustível;
- M1 : Combustível mas não inflamável;
- M2 : Combustível e dificilmente inflamável;
- M3 : Combustível e medianamente inflamável;
- M4 : Combustível e facilmente inflamável.

A madeira é classificada por M3, mas caso se encontre impregnada com produtos anti fogo, pode alcançar a classe M2 ou M1. A reacção ao fogo depende da espécie de madeira, isto é, da densidade, e da espessura, quanto menor for a espessura do elemento de madeira, mais desfavorável é a reacção ao fogo, acontecendo a mesma variação com a densidade. Portanto, para a madeira apresentar uma boa resistência ao fogo, deve possuir uma densidade elevada, e uma boa espessura. Apresenta-se em seguida na Tabela 3.3, as diferentes classes de acordo

com a espessura e a classe botânica da madeira.

Tabela 3.3 - Classes de Reacção da Madeira ao Fogo de Acordo com a Espessura e a Classe Botânica

Designação da Madeira	Espessura (mm)	Classe
Madeira maciça de resinosas	≤ 18	M4
	> 18	M3
Madeira maciça de folhosas	≤ 14	M4
	> 14	M3

Apesar da madeira ser combustível, esta não arde rapidamente, e raras são as situações em que um incêndio tenha ocorrido por esta ter sido o primeiro material a arder. O que a torna combustível é a sua composição química à base de compostos de carbono, oxigénio e hidrogénio (celulose, hemicelulose e lenhina). Na ausência de chama, a madeira para começar a arder necessita de estar exposta a uma temperatura superior a 400°C, durante um período que poderá ser curto ou médio, conforme as espécies [3.07]. Quando na presença de chama, para começar a arder necessita de uma temperatura à superfície de aproximadamente 300°C durante um certo período de tempo, antes de se iniciar a ignição.

A combustão da madeira ao contrário de muitos outros materiais, diferencia-se devido a esta apresentar um comportamento com características favoráveis. Numa primeira fase ocorre a combustão da superfície da madeira, originando uma capa carbonizada. Por baixo desta camada encontra-se uma outra, zona de pirólise, consistindo na camada em que se desenvolve o processo de decomposição dos constituintes químicos da madeira (celulose, hemicelulose e lenhina). Sob a zona de pirólise, encontra-se madeira sã, sem qualquer sinal de degradação. A camada carbonizada fornece à madeira uma protecção ao seu interior, aumentando a resistência térmica e, proporcionando ao interior uma conservação da temperatura a que este naturalmente se encontra.

A degradação por combustão dos elementos de madeira, deve-se à perda de secção, isto é, à redução das dimensões das peças, e não por perda de resistência do material, ou de consumo da totalidade dos elementos [3.07].

Encontra-se provado cientificamente que existe uma relação linear entre a profundidade de carbonização e o tempo de exposição. Pode assim considerar-se uma velocidade de



carbonização constante, possibilitando o cálculo das secções residuais dos elementos numa situação de incêndio após um determinado período de tempo. A madeira de árvores resinosas, apresenta uma velocidade de carbonização de 0,67 mm / min (para uma densidade superior a 290,00 kg / m<sup>3</sup>), e a madeira de árvores folhosas apresenta uma velocidade de carbonização de 0,54 mm / min (para uma densidade superior a 350,00 kg / m<sup>3</sup>).

### **3.10.2 Propriedades Mecânicas**

Do ponto de vista da estabilidade estrutural e, da durabilidade do material, as propriedades mecânicas são extremamente importantes para a caracterização e classificação do material, permitindo assim, que seja possível escolher-se a espécie de madeira mais apropriada.

As propriedades mecânicas da madeira apresentam uma grande variabilidade, em grande parte devido à sua estrutura anisotrópica mas também, devido à presença de defeitos, densidade, temperatura, duração da carga e, ao teor de humidade. Não só existem diferenças entre espécies, como também em indivíduos da mesma espécie. Cada árvore é única e, está exposta a condições climáticas que podem ser muito diferentes, como o vento, a chuva, a exposição solar, entre outros. Para além dos factores extrínsecos, os factores internos interferem nas propriedades da madeira, levando a diferentes comportamentos conforme as solicitações em causa. Considerando a ortotropia da madeira, apresenta propriedades distintas conforme a direcção em análise, três planos distintos que a caracterizam, plano longitudinal, plano radial e plano tangencial, as propriedades mecânicas são definidas tendo em consideração as diferentes direcções. Apesar da diferença das propriedades entre o plano radial e tangencial, estas não são significativas quando comparadas com as do plano longitudinal, é por esse motivo que se apenas define o comportamento da madeira na direcção paralela às fibras (plano longitudinal) e, na direcção perpendicular às fibras (plano radial e tangencial).

Existem dois processos para se avaliar a resistência mecânica da madeira, o mais antigo consiste na obtenção de provetes pequenos (20x20 mm de secção transversal), sem defeitos, ou seja, fio direito, sem nós, sem fendas, entre outros. Ao não existirem defeitos nos provetes, elimina-se desta forma a necessidade de utilização de factores de correcção [3.12]. Ao compararmos estes provetes com os elementos reais, verifica-se que estes possuem dimensões muito reduzidas, não traduzindo as situações normais de peças de carácter estrutural. Para

além disso, ao não possuírem defeitos está-se a otimizar os valores de referência para as propriedades mecânicas [3.13]. O processo mais recente para avaliação da resistência mecânica consiste na classificação prévia da madeira, medindo a resistência em peças de dimensão real (possuindo defeitos), eliminando-se a necessidade de utilização de factores de correcção devido aos defeitos [3.12].

Nos próximos pontos irão ser apresentadas as diversas propriedades mecânicas da madeira, com o objectivo de se caracterizar a reacção do material às diversas solicitações a que possa estar sujeito.

#### 3.10.2.1 Compressão Paralela às Fibras

Consiste na resistência a uma carga aplicada na direcção paralela às fibras (ver Figura 3.18), medida pela tensão de rotura à compressão nesta direcção. A madeira atinge valores elevados de resistência à compressão no sentido das fibras, sendo uma propriedade extremamente importante em pilares. O baixo módulo de elasticidade que a madeira apresenta, conduz a que na prática a resistência à compressão seja mais reduzida, consequência do fenómeno de encurvadura das peças, que faz com que as fibras fiquem desalinhas, dificultando a transmissão das cargas aplicadas [3.07 ; 3.09].



Figura 3.18 - Compressão paralela às fibras [3.09].

#### 3.10.2.2 Compressão Perpendicular às Fibras

Consiste na resistência da madeira a uma carga aplicada na direcção perpendicular às fibras (ver Figura 3.19), medida pela compressão de rotura nesta direcção. A madeira apresenta baixos valores de resistência nesta direcção. A madeira possui menor quantidade de fibras nesta direcção, para além, da quase inexistência de travamento entre as fibras existentes, o que

explica a fraca resistência. Na realidade as árvores não se encontram sujeitas a esforços nesta direcção, o que faz com que a sua constituição esteja de acordo com as solicitações a que estão sujeitas [3.07 ; 3.09].

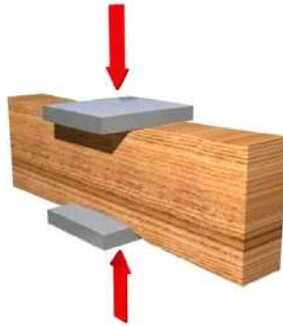


Figura 3.19 - Compressão perpendicular às fibras [3.09].

#### 3.10.2.3 Flexão Estática

Consiste na resistência da madeira a uma carga pontual, aplicada a meio vão (ver Figura 3.20), medida pela flexão de rotura. A madeira apresenta valores elevados de resistência à flexão estática, sobretudo quando relacionados com a densidade. A resistência à flexão resulta na combinação de fibras superiores traccionadas e, de fibras inferiores comprimidas. Esta propriedade é importante no caso das vigas [3.07 ; 3.09].

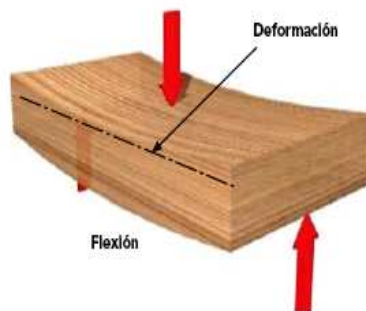


Figura 3.20 - Flexão estática [3.09].

#### 3.10.2.4 Tracção Paralela às Fibras

Consiste na resistência da madeira a uma força de tracção na direcção paralela às fibras (ver Figura 3.21), medida pela tensão de rotura axial. A madeira apresenta valores elevados de tracção paralela às fibras. Esta propriedade é importante no caso dos tirantes e pendurais das asnas [3.07 ; 3.09].



Figura 3.21 - Tração paralela às fibras [3.09].

#### 3.10.2.5 Tração Perpendicular às Fibras

Consiste na resistência da madeira a uma força de tração na direcção perpendicular às fibras (ver Figura 3.22), medida pela tensão de rotura transversal. A madeira apresenta valores muito baixos para a resistência à tração perpendicular às fibras, tal como para as outras propriedades transversais. Esta propriedade é importante no caso de vigas curvas e arcos [3.07 ; 3.09].

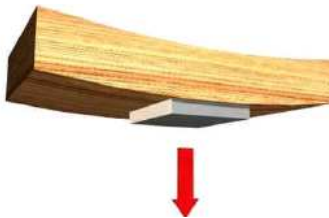


Figura 3.22 - Tração perpendicular às fibras [3.09].

#### 3.10.2.6 Módulo de Elasticidade

O módulo de elasticidade consiste na capacidade que um corpo possui para recuperar o seu estado inicial (forma e dimensões), após ter sido retirada a carga que originou a deformação. Quanto maior for o módulo de elasticidade, mais resistente é o material à deformação, ou seja, sob a acção de uma determinada carga atinge menores deformações, aproximando-se mais do seu estado inicial [3.13].

A madeira é um material que possui um módulo de elasticidade baixo comparativamente com outros materiais, aço, betão, vidro, mas em contrapartida, quando se relaciona o módulo de elasticidade com a própria densidade do material a madeira apresenta um valor próximo do aço [3.13].

A madeira apresenta vários módulos de elasticidade, quer de acordo com a direcção das fibras, direcção paralela e perpendicular às fibras, quer de acordo com as solicitações a que está submetida (tração, compressão e flexão). Na prática utiliza-se apenas o valor do módulo de

elasticidade para a direcção paralela às fibras e direcção perpendicular às fibras, considerando-se um valor médio entre os módulos de elasticidade à compressão e à tracção. O módulo de elasticidade na direcção perpendicular às fibras é cerca de 30 vezes inferior ao paralelo às fibras [3.07]. Para as resinosas o módulo de elasticidade na direcção paralela às fibras varia entre 7 a 16 GPa e, na direcção perpendicular às fibras varia entre 0,23 a 0,53 GPa. No caso das folhosas, o módulo de elasticidade na direcção paralela às fibras varia entre 10 a 20 GPa e, na direcção perpendicular às fibras varia entre 0,64 a 1,33 GPa [3.05].

#### 3.10.2.7 Corte

O esforço por corte origina tensões tangenciais que actuam sobre as fibras da madeira, actuando no plano paralelo às fibras e, no plano perpendicular às fibras. Conforme as diversas solicitações de corte, a rotura pode ocorrer por deslizamento das fibras umas em relação às outras, isto para o plano paralelo, por corte, para o plano perpendicular e, por rotação. Normalmente as tensões por deslizamento são muito mais gravosas, produzindo-se a rotura mais facilmente nestes planos.

A madeira apresenta uma resistência ao corte no plano paralelo às fibras bastante reduzida, fracturando-se com relativa facilidade. A resistência da madeira ao corte no plano perpendicular às fibras é de 3 a 4 vezes superior ao plano paralelo às fibras, mas na prática tem pouca importância devido à fractura ocorrer previamente por corte axial. Os valores da resistência ao corte em resinosas variam entre 1,7 a 3,8 MPa, e em folhosas entre 3 a 6 MPa [3.05]. A resistência ao corte assume um papel relevante em vigas, e principalmente em vigas curtas.

#### 3.10.2.8 Dureza

A dureza é a propriedade que traduz a resistência da madeira à penetração de corpos estranhos na sua massa (ver Figura 3.23). É uma propriedade muito importante para a avaliação do material ao desgaste à abrasão, servindo de referência para a escolha de espécies de madeira adequadas para pavimentos. A resistência à abrasão é mais elevada, cerca do dobro, na direcção paralela às fibras, relativamente à direcção perpendicular às fibras [3.13].



Figura 3.23 - Dureza na direcção paralela às fibras [3.09].

#### 3.10.2.9 Factores que Influenciam as Propriedades Mecânicas

Existem vários factores que influenciam o comportamento mecânico da madeira, originando variações nas suas propriedades, que se reflectem em fenómenos prejudiciais ao seu comportamento, nomeadamente o teor em água, a duração da carga, os defeitos da madeira, a temperatura e o efeito de escala.

O teor em água reflecte-se nas propriedades mecânicas da madeira, quando este aumenta diminui a resistência e o módulo de elasticidade. Apenas para teores em água abaixo do ponto de saturação das fibras é que a variação ocorre, acima deste valor não se verifica alteração das propriedades mecânicas. Com o aumento do teor em água ocorre a expansão das paredes celulares e, com a presença de água nas cavidades entre células, passa a existir um maior afastamento entre as microfibrilas, situação que conduz a uma diminuição da resistência mecânica [3.07 ; 3.13]. Na prática, a relação do teor em água com a resistência mecânica pode ser considerada linear, variando cerca de 2 a 6 % por cada 1 % de variação do teor em água, para valores abaixo do ponto de saturação das fibras.

Diversos autores têm constatado mediante ensaios laboratoriais, que a resistência da madeira depende muito do período de duração da carga a que está sujeita [3.07]. Para cargas de duração permanente atinge valores de resistência de aproximadamente 60 % da resistência para cargas de curta duração ( $5 \pm 2$  min) [3.07]. A influência da duração da carga depende muito da qualidade da madeira, isto é, se a mesma se encontra livre de defeitos. As madeiras de má qualidade apresentam muitos nós originando por isso um pior comportamento.

Relacionado com a duração da carga, a madeira pode apresentar dois fenómenos diferentes, fadiga e fluência. A fadiga corresponde ao fenómeno do aumento da deformação com o tempo, com a sujeição da madeira a uma carga periódica [3.13]. A fluência corresponde ao fenómeno

do aumento da deformação com o tempo, com a sujeição da madeira a uma carga permanente [3.13].

A qualidade da madeira é um dos factores de maior relevância, os possíveis defeitos que a madeira possa apresentar levam a uma diminuição das suas propriedades mecânicas. Os vários defeitos que se podem encontrar na madeira são:

- nós – pontos onde existiam ramos no tronco, existindo um desvio de direcção das fibras longitudinais;
- fendas – zonas de descontinuidade (aberturas), provocadas por secagem rápida, ou por tensões de crescimento, ou até mesmo por defeitos ;
- gretas – separação dos anéis anuais, provocada por acções externas ou por tensões internas;
- abaulamento – ganho de curvatura na direcção da largura da peça;
- arqueamento – ganho de curvatura na direcção longitudinal;
- desvios da fibra (inclinação do fio) – alteração da direcção das fibras em relação ao eixo longitudinal;
- lenho de reacção – zonas do tronco da árvore sujeitas a acções externas originando propriedades anormais, maior espessura de anéis, maior retracção e dilatação com a secagem;
- bolsas de resina e casca inclusa – cavidades existentes na madeira, que contêm gomas ou resinas;
- descaio – falha de madeira nas arestas da peça.

O efeito da temperatura na resistência mecânica da madeira é muito reduzido. Abaixo dos 0°C, a resistência à flexão e à compressão aumenta devido ao congelamento da água nas paredes celulares [3.13]. Para temperaturas elevadas, e de uma forma constante, a madeira pode sofrer uma diminuição das suas propriedades mecânicas, mas a variação é mais notória para temperaturas superiores a 50 °C.

O tamanho dos elementos de madeira é muito importante para a sua resistência mecânica, de tal forma de que quanto maior for a peça, menor é a tensão de rotura [3.07]. Designa-se

portanto de efeito de escala, as variações da resistência de acordo com as dimensões das peças.



### 3.11 Bibliografia - Capítulo 3

- [3.01] FABIÃO, ANTÓNIO M. ; 1996 - *Árvores e Florestas*. Coleção Agro, 2ª ed. Publicações Europa América, Mem Martins.
- [3.02] HUMPHRIES, C. J. ; SUTTON, J. R., 1996 - *Árvores de Portugal e Europa*. Fundo Para a Protecção dos Animais Selvagens (FAPAS) ; Câmara Municipal do Porto, Porto.
- [3.03] CARVALHO, ALBINO ; 1996 - *Madeiras portuguesas - Vol. 1 - Estrutura Anatómica, propriedades, utilizações*. Instituto Florestal, Lisboa.
- [3.04] RIDOUT, BRIAN ; 2000 - *Timber decay in buildings - The conservation approach to treatment*. English Heritage ; Historic Scotland, London.
- [3.05] CACHIM, PAULO B. ; 2007 - *Construções em madeira - A madeira como material de construção*. Publindústria, Porto.
- [3.06] TAMPONE, GENNARO ; 1996 - *Il restauro delle strutture di legno*. Biblioteca Tecnica Hoepli, Milano.
- [3.07] ALVAREZ, RAMÓN ; CALLEJA, JUAN ; MARTITEGUI, FRANCISCO ; 2000 - *Estructuras de madera - Diseño y cálculo*. 2ª ed. AITIM, Madrid.
- [3.08] PFEIL, MICHÈLE ; PFEIL, WALTER, ; 2003 - *Estructuras de madeira*. 6ª ed. LTC Editora. Rio de Janeiro.
- [3.09] CORMA, CORPORACION CHILENA DE LA MADERA - *Manual - La construcción de viviendas en madera*. Chile.
- [3.10] UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA) ; 1999 - *Wood handbook - wood as an engineering material*. Forest Products Laboratory, Wisconsin.
- [3.11] BRANCO, PAZ ; CARDOSO, RAUL ; MARTINS, JOSÉ ; 2007 - *Obras de madeira em toco e limpo na construção civil*. 6ª ed. Edições Gustave Eiffel, Amadora.
- [3.12] COUTINHO, JOANA ; 1999 - *Madeiras*. Apontamentos de Materiais de Construção I. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [3.13] GRAÇA, JOSÉ ; 2007 - *Métodos de análise dos produtos florestais ; Propriedades físicas e mecânicas*. Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa.



## **4. CLASSIFICAÇÃO E REQUISITOS DA MADEIRA**

### **4.1 Generalidades**

A utilização da madeira como material estrutural implica um maior conhecimento e, caracterização na sua aplicação, nomeadamente das suas propriedades físicas e mecânicas. O facto de ser um material natural faz com que a probabilidade de existir uma grande variabilidade nas suas características seja muito elevada. A variabilidade conduz a uma maior preocupação na selecção da espécie de madeira e, a uma maior definição das reais propriedades da madeira mesmo antes da sua aplicação.

Como forma de se conseguir comparar as propriedades entre as diversas espécies de madeira, foi necessário implementar-se uma normalização para estipular os ensaios sobre provetes de madeira e, quais os defeitos admissíveis.

Toda e qualquer utilização na construção de produtos de madeira e seus derivados, deve ocorrer tendo como base um conhecimento prévio da durabilidade da espécie de madeira que se deseja aplicar. Este conhecimento permitirá ao utilizador seleccionar a espécie de madeira mais conveniente de acordo com a utilização e, com a exposição aos agentes agressivos, isto é, o risco de exposição.

Actualmente encontra-se implementado na Europa um conjunto de normas sobre a utilização, tratabilidade e durabilidade da madeira, em que algumas das mais utilizadas serão apresentadas neste capítulo.

### **4.2 Classificação da Madeira**

#### **4.2.1 Tipos de Classificação**

Tal como já foi referido anteriormente, a madeira apresenta uma grande variabilidade nas suas propriedades entre as diversas espécies existentes, populações, e nos próprios espécimes, havendo uma variação das suas propriedades ao longo do seu comprimento e secção transversal. A própria serragem pode afectar as propriedades das peças de madeira. Das peças de madeira extraídas do mesmo tronco, a resistência da peça mais fraca em comparação com a da peça mais resistente, varia numa proporção de 1 para 10 [4.01].

A classificação da madeira surgiu como forma de se tentar minimizar o subaproveitamento da madeira, que teria como consequência um sobrecusto devido à utilização no dimensionamento estrutural dos valores característicos da resistência, correspondentes em geral ao quinto percentil (5 % da população) [4.01].

A madeira é classificada através de métodos não destrutivos e por inspeção visual, sendo todas as peças verificadas uma a uma. A resistência das peças é estimada através da relação com as características que se obtêm dos ensaios.

#### **4.2.2 Normas Relacionadas**

As normas europeias e portuguesas mais utilizadas, que regulamentam a classificação da madeira são as seguintes:

- EN 518: 1995 – “Structural Timber – Grading – Requirements for visual strength grading standard” [4.02];
- EN 519: 1995 – “Structural Timber – Grading – Requirements for machine strength graded timber and grading machines” [4.03];
- NP 4305: 1995 – “Madeira serrada de pinheiro bravo para estruturas. Classificação visual” [4.04];
- EN 1912: 2004 – “Structural Timber – Strength classes – Assignment of visual grades and species” [4.05];
- EN 384: 2004 – “Structural Timber – Determination of characteristic values of mechanical properties and density” [4.06];
- EN 408: 2003 – “Timber Structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties” [4.07].

A norma EN 518: 1995, define as regras para a caracterização visual da madeira, impondo os limites mínimos para algumas propriedades da madeira a analisar, e a avaliação dos defeitos existentes, quer em folhosas quer em resinosas, e em madeira serrada para uma utilização estrutural [4.02]. São impostos nesta norma os parâmetros seguintes:

- a dimensão máxima dos nós;
- o desvio do fio;
- a taxa de crescimento dos anéis;

- os comprimentos máximos para as fissuras em ambas as direcções;
- o descaio máximo;
- os valores máximos para a distorção.

A norma EN 519: 1995, fornece as regras para a caracterização da madeira com base em ensaios mecânicos, de acordo com os seguintes parâmetros [4.03]:

- estipula os requisitos obtidos com a inspecção visual;
- estipula as regras para a obtenção de características através dos equipamentos mecânicos.

A norma NP 4305: 1995, apresenta a classificação visual para a madeira serrada de pinheiro bravo para utilização estrutural, definindo também dois tipos de classes de pinho bravo, a classe E (para utilização estrutural) e a classe EE (utilização em estruturas especiais, pontes por exemplo) com base nos seguintes parâmetros [4.04]:

- o descaio máximo;
- o desvio do fio;
- o número de nós e, o afastamento entre os mesmos;
- a taxa de crescimento dos anéis;
- os comprimentos máximos para as fissuras em ambas as direcções;
- os empenamentos máximos.

A norma EN 1912: 2004, especifica a classificação obtida com a inspecção visual de acordo com as espécies, com a origem e, identifica quais as classes de resistência em que estão inseridas [4.05].

A norma EN 384: 2004, especifica os métodos para determinação dos valores característicos das propriedades mecânicas e de densidade, para as populações de madeira definidas na classificação visual e mecânica, definindo os seguintes parâmetros [4.06]:

- as amostras;
- os ensaios a efectuar;
- os cálculos a efectuar para determinação das propriedades, módulo de elasticidade médio, resistência característica e densidade;

- métodos alternativos para determinação de propriedades mecânicas.

A norma EN 408: 2003 define os ensaios para caracterização mecânica e física em madeira lamelada colada [4.07].

#### **4.2.3 Classes de Resistência**

O agrupamento das peças de madeira por classes de resistência permitiu juntar peças com propriedades idênticas, apesar de poderem ser de espécies e origens diferentes. A classificação da madeira por classes de resistência simplificou o dimensionamento dos elementos estruturais, visto esta eliminar a necessidade de se especificar a espécie de madeira e a sua origem.

A norma que estipula as classes de resistência é a EN 338 : 2003 - "Structural Timber Strength Classes", esta apresenta as nove classes de resistência possíveis para as espécies de coníferas e choupo e, seis classes para as espécies de folhosas [4.08].

#### **4.3 Durabilidade e Tratabilidade**

A madeira é um material natural susceptível a ataques de organismos biológicos, como os fungos, o caruncho, as térmitas e, os xilófagos marinhos. Apesar destes organismos serem uma ameaça ao desempenho do material, e por conseguinte à sua longevidade, a madeira pode possuir uma durabilidade natural conferindo uma protecção contra os ataques biológicos. A durabilidade varia de espécie para espécie, e define-se como a resistência natural da madeira face aos agentes xilófagos, sem o tratamento com produtos preservadores. A durabilidade depende da composição química da madeira, tal como já referido no capítulo anterior, estando relacionada com a quantidade e com a presença de determinadas substâncias extractivas.

A norma NP EN 350-1: 2001, "Durabilidade da madeira e de produtos derivados. Durabilidade natural da madeira maciça. Parte 1: Guia de princípios de ensaio e classificação da durabilidade natural da madeira", indica os procedimentos para a determinação e classificação da durabilidade natural relativas a uma determinada espécie de madeira [4.09]. Estipula as classes de durabilidade existentes para os diversos tipos de ataques biológicos: fungos, carunchos, térmitas e xilófagos marinhos, conforme se pode verificar na Tabela 4.1 abaixo apresentada.

O borne de todas as espécies de madeira é sempre considerado susceptível a todos os ataques biológicos, isto deve-se ao facto de ser no borne que existe a maior quantidade de nutrientes, é nesta zona que ocorre o transporte dos nutrientes. O cerne oferece sempre alguma durabilidade,

devido a conter substâncias extractivas, mas as mesmas podem não ser suficientes conforme o agente biológico em causa, daí ser necessário conjugar a durabilidade natural das espécies com a possibilidade de um tratamento preservador, conforme será visto mais adiante.

Tabela 4.1 - Classes de Durabilidade Natural Para Madeira Maciça [4.09]

Agentes de Degradação	Classes de Durabilidade				
	1	2	3	4	5
Fungos *	Muito Durável	Durável	Moderadamente Durável	Pouco Durável	Não Durável
Carunchos **	D Durável	S Susceptível	– –	– –	– –
Térmitas ***	D Durável	M Moderadamente Susceptível	S Susceptível	– –	– –
Xilófagos Marinhos ***	D Durável	M Moderadamente Susceptível	S Susceptível	– –	– –

\*Válido para o cerne, o borne é sempre da classe 5, salvo se houver informação em contrário.

\*\* A madeira do cerne é durável, salvo se houver indicação em contrário.

\*\*\* É aplicável em relação ao cerne, o borne é sempre susceptível para todas as espécies.

A utilização da norma EN 350-1: 2001 torna-se bastante útil, permitindo que as opções tomadas na escolha de uma determinada espécie de madeira, com base apenas na durabilidade natural, conduzam a desempenhos mais elevados por parte dos elementos de madeira. De acordo com a referida norma é possível determinar a durabilidade natural para qualquer espécie de madeira, desde que se efectuem os ensaios de campo e os ensaios laboratoriais [4.09]. Com os conhecimentos adquiridos acerca das madeiras mais comercialmente utilizadas, a norma EN 350-2: 2001, “Durabilidade da madeira e de produtos derivados. Durabilidade natural da madeira maciça. Parte 2: Guia da durabilidade natural da madeira e da impregnabilidade das espécies de madeira seleccionadas pela sua importância na Europa”, veio facilitar a classificação da durabilidade da grande maioria das espécies comercializadas na Europa, apresentando a lista da durabilidade natural e de impregnabilidade para essas espécies [4.10]. A título de exemplo, de acordo com a norma EN 350-2: 2001, a madeira de acácia bastarda apresenta um comportamento muito durável e durável face aos fungos, um comportamento susceptível ao caruncho, e um comportamento durável face às térmitas. Esta informação é extremamente útil, porque desde já fornece um conjunto de dados que em função do risco de exposição aos

ataques biológicos, conforme se apresentará no próximo capítulo, permite prever antecipadamente o comportamento que uma determinada espécie de madeira irá apresentar.

Apesar da madeira poder apresentar uma resistência natural aos ataques biológicos, por vezes, mesmo sendo durável não é suficiente. Nestas situações é aconselhável o tratamento das madeiras com produtos que melhorem a sua durabilidade. Torna-se então necessário definir-se qual a tratabilidade de uma determinada espécie de madeira. A tratabilidade consiste na eficácia que um tratamento de protecção pode apresentar, com base na quantidade de produto absorvido pela madeira e, na profundidade com que o mesmo a penetra [4.11]. Isto é, a tratabilidade depende da facilidade com que o produto é absorvido pela madeira, dependendo da porosidade e do teor de água [4.01].

A norma EN 350-2: 2001, apresenta para as espécies de madeira listadas a sua tratabilidade, definindo para o efeito quatro classes, conforme se pode constatar na Tabela 4.2 abaixo apresentada.

Tabela 4.2 - Classes de Tratabilidade para Madeira Maciça [4.10].

Classes de Tratabilidade	Designação	Explicação
1	Fácil (permeável)	A madeira serrada pode ser tratada completamente por pressão sem dificuldade.
2	Moderadamente fácil (moderadamente resistente)	A penetração completa não é normalmente possível, mas após 2 a 3 horas de tratamento por pressão, mais de 6 mm de penetração lateral podem ser alcançados, nas folhosas e resinosas uma grande proporção de vasos será penetrada.
3	Difícil (resistente)	A penetração completa não é possível, atingindo-se após 3 a 4 horas de tratamento por pressão, 3 a 6 mm de penetração lateral podem ser alcançados.
4	Extremamente difícil (extremamente resistente)	Pequenas quantidades de produto preservador absorvido mesmo após 3 a 4 horas de tratamento por pressão quer lateral quer longitudinalmente.



#### **4.4 Classes de Risco**

A longevidade de todos os materiais depende da exposição aos agentes agressivos a que estes possam estar sujeitos. A madeira não é exceção, mesmo as madeiras mais duráveis quando sujeitas a condições de serviço severas, atingem uma degradação rápida e, em algumas situações incontrolável. A mesma espécie de madeira exposta a diferentes ambientes, tanto pode durar séculos como apenas alguns anos. É crucial uma boa caracterização do local em que a madeira irá estar inserida, sendo necessário uma previsão de possíveis alterações que possam surgir na zona envolvente, que tenham repercussões na estabilidade comportamental dos elementos de madeira. A madeira é portanto um material profundamente dependente do ambiente envolvente e, também em grande parte, dos pormenores de execução. Havendo cuidados nestas variáveis, a longevidade do material aumentará. É neste sentido, que a classificação do risco ajuda a caracterizar o ambiente a que a madeira será exposta, definindo-se previamente a necessidade de tratamentos com produtos preservadores ou a utilização de espécies mais duráveis, com base na agressividade do meio envolvente quando em serviço. O risco de ataque biológico está quase totalmente condicionado pelo teor em água que a madeira possa atingir em condições de serviço.

Para se estabelecer um conjunto de especificações que ajudariam a enquadrar os possíveis ataques biológicos de acordo com as condições de serviço no desempenho da madeira, foram definidas cinco classes de risco possíveis de acordo com as normas NP EN 335-1: 1994, “Durabilidade da madeira e de produtos derivados. Definição das classes de risco de ataque biológico. Parte 1: Generalidades.” [4.12] e, NP EN 335-2: 1994, “Durabilidade da madeira e de produtos derivados. Definição das classes de risco de ataque biológico. Parte 2: Aplicação à madeira maciça.” [4.13]. A parte 1 da NP EN 335, apresenta as cinco classes de risco genéricas, para as diversas situações, podendo ser aplicadas para madeira maciça e, para produtos derivados da madeira. A parte 2 da NP EN 335, define as classes de risco para a madeira maciça de uma forma mais específica. Na Tabela 4.3, serão apresentadas as diversas classes de risco para a madeira maciça.

Tabela 4.3 - Classes de Risco para Madeira Maciça (NP EN 335-2: 1994) [4.11 ; 4.13 ; 4.14]

Classes de Risco	Tipo de Ambiente	Definição	Observações
1	Madeira em ambientes interiores permanentemente seca	O elemento está coberto, protegido da intempérie, e não está sujeito a humidade. Nestas circunstâncias em virtude do teor de humidade ser aproximadamente 18 %, não existe risco de ataque por fungos. Contudo em madeira não durável e não tratada, é frequente o ataque por insectos (térmitas e carunchos), com mais incidência dos carunchos. Por exemplo, estruturas de coberturas e pavimentos, soalhos, parkets, lambris, aros de vãos, portas interiores, paredes de madeira, entre outros.	A gravidade e a facilidade de reparação destas patologias, depende do elemento afectado, da facilidade de acesso e, da extensão do ataque.
2	Madeira em ambientes interiores com humidade baixa podendo temporariamente ultrapassar os 20 %	O elemento encontra-se coberto e protegido da intempérie, podendo ocasionalmente alcançar uma humidade ambiental elevada. Nestas circunstâncias o teor de humidade do elemento de madeira pode ultrapassar ocasionalmente 20 %, parcialmente ou na totalidade da peça. Existe o risco de ataque tanto por carunchos como por térmitas, podem-se desenvolver fungos de podridão e cromogéneos na superfície da madeira. Por exemplo, estruturas de cobertura, zonas em contacto com alvenarias ou sob a acção directa de infiltrações de água acidentais, instalações sanitárias, entre outras.	Normalmente as podridões têm um carácter bem localizado, não havendo grandes problemas na substituição do material.
3	Madeira no exterior ou exposta a qualquer fonte de humedecimento permanente sem contacto com o solo	O elemento encontra-se a descoberto e exposto à intempérie, não se encontrando em contacto com o solo e, está sujeito a uma humidificação permanente. Nestas condições o teor de humidade do elemento de madeira pode ultrapassar os 20 %. O risco de ataque por fungos de podridão é elevado, particularmente se não forem respeitadas certas disposições construtivas adequadas, nem dispensadas medidas de protecção e conservação. Podem surgir ocasionalmente ataques de térmitas e carunchos, dependendo da região geográfica. Por exemplo, caves de edifícios, instalações sanitárias, cozinhas, caixilharias exteriores, revestimentos exteriores, entre outros.	Ocorrem normalmente em zonas húmidas mal ventiladas.
4	Madeira no exterior e em contacto com o solo exposta permanentemente à humidade	O elemento encontra-se em contacto com o solo ou com água doce, estando sujeito permanentemente a uma humidade superior a 20 %. Os fungos de podridão e as térmitas são o principal problema, dado que a conjugação dos dois agentes pode provocar uma destruição extremamente rápida da madeira, se esta apresentar uma durabilidade natural baixa e não tiver sido tratada convenientemente. Por exemplo, estacas de fundação expostas acima do nível freático, soleiras e, estruturas de fundação diversas, entre outros.	O risco de ataque varia com o grau de infestação da zona e com a localização da madeira dentro do edifício, sendo mais importante ao nível dos pisos térreos.
5	Madeira no exterior e em contacto com o solo exposta permanentemente à água salgada	O elemento encontra-se permanentemente em água salgada, estando sujeito permanentemente a uma humidade superior a 20 %. Nesta situação o principal problema são os xilófagos marinhos, podendo ocorrer ataques por fungos de podridão e de térmitas nas partes expostas acima do nível do mar. Por exemplo, construções em água salgada (pontes, pontões), embarcações, entre outros.	O risco de ataque varia com o grau de infestação da zona.

Após ter-se verificado a possibilidade de antecipação de um mau desempenho da madeira, com vista na escolha de uma espécie inadequada de acordo com a durabilidade natural e, após ter-se constatado que é possível caracterizar as espécies de madeira relativamente à possibilidade de serem facilmente tratadas com produtos preservadores, constata-se a importância do relacionamento destes conceitos com as classes de risco a que os elementos de madeira estarão expostos. É relevante, que para uma determinada classe de risco, sejam exigidas determinadas características aos elementos de madeira, o que por sua vez, conduz-nos à escolha da espécie mais adequada relativamente à durabilidade necessária e à tratabilidade. É neste sentido que a norma NP EN 460: 1995, “Durabilidade da madeira e de produtos derivados. Durabilidade natural da madeira maciça. Guia de exigências de durabilidade das madeiras na sua utilização segundo as classes de risco” [4.15], define as características de durabilidade e a necessidade da utilização de tratamentos preservadores para a madeira maciça, exigidas para as diferentes condições de utilização, ou seja, para as diferentes classes de risco (ver Tabela 4.4).

Tabela 4.4 - Exigências de Durabilidade e de Tratamento Preservador de acordo com a Classe de Risco [4.01].

Classe de Risco	Classes de Durabilidade				
	1	2	3	4	5
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	(0)	(0)
3	0	0	(0)	(0)- (X)	(0) - (X)
4	0	(0)	(X)	X	X
5	0	(X)	(X)	X	X

Notas: 0 : durabilidade natural suficiente; (0) : durabilidade natural normalmente suficiente mas para certas utilizações pode ser recomendado um tratamento preservador; (0) - (X) : a durabilidade natural pode ser suficiente mas em função da espécie de madeira, da sua permeabilidade e do seu emprego final pode justificar-se a necessidade de um tratamento preservador; (X) : o tratamento preservador é normalmente recomendado mas para certas utilizações a durabilidade natural pode ser suficiente; X : o tratamento preservador é necessário.

Espera-se que com a aplicação de todas as normas aqui apresentadas a madeira como material de construção adquira uma maior longevidade, tal como há muitos séculos atrás, em que ainda hoje vemos edifícios em estrutura de madeira totalmente intactos devido à preocupação na escolha das espécies de madeira a utilizar de acordo com o local em que iriam ser aplicadas e, de acordo com a função a desempenhar. Na expectativa de que a construção evolua no sentido de maior rigor no desempenho dos materiais, é totalmente possível incluir-se a madeira como

um dos materiais de boa durabilidade, desde que sejam cumpridos os requisitos aconselhados à sua utilização, podendo ser equiparada a outros materiais, como o aço e o betão, por exemplo.

## 4.5 Bibliografia - Capítulo 4

- [4.01] CACHIM, PAULO B. ; 2007 - *Construções em madeira - A madeira como material de construção*. Publindústria, Porto.
- [4.02] CEN ; 1995 - *EN 518: Structural - Grading - Requirements* for visual strength grading standards.
- [4.03] CEN ; 1995 - *EN 519: Structural - Grading - Requirements* for machine strength graded timber and grading machine.
- [4.04] IPQ ; 1995 - *NP 4305: Madeira serrada de pinheiro bravo para estruturas*.
- [4.05] BS ; 2004 - *EN 1912: Structural timber strength classes - Assignment of visual grades and species*.
- [4.06] CEN ; 2004 - *EN 384: Structural Timber – Determination of characteristic values of mechanical properties and density*.
- [4.07] CEN ; 2003 - *EN 408: Timber Structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties*.
- [4.08] CEN ; 2003 - *EN 338: Structural timber - Strength classes*.
- [4.09] IPQ ; 2001 - *NP EN 350 - 1: Durabilidade da madeira e de produtos derivados, durabilidade natural da madeira maciça. Parte 1: Guia dos princípios de ensaio e classificação da durabilidade natural da madeira*.
- [4.10] IPQ ; 2000 - *NP EN 350 - 2: Durabilidade da madeira e de produtos derivados, durabilidade natural da madeira maciça. Parte 2: Guia da durabilidade natural da madeira e da impregnabilidade das espécies de madeira seleccionadas pela sua importância na Europa*.
- [4.11] ALVAREZ, RAMÓN ; CALLEJA, JUAN ; MARTITEGUI, FRANCISCO ; 2000 - *Estructuras de madera - Diseño y cálculo*. 2ª ed. Aitim, Madrid.
- [4.12] BS ; 2006 - *EN 335 - 1: Durability of wood and wood-based products - Definition of use classes. Part 1 - General*.
- [4.13] LNEC ; 1994 - *NP EN 335 - 2: Durabilidade da madeira e de produtos derivados. Definição das classes de risco de ataque biológico. Parte 2: aplicação à madeira maciça*.
- [4.14] FEIO, ARTUR ; 2007 - *Estruturas de madeira*. Apointamentos de Patologia das Construções, Mestrado em Engenharia Civil. Universidade do Minho.

[4.15] LNEC ; 1995 - *NP EN 460: Durabilidade da madeira e de produtos derivados.*

*Durabilidade natural da madeira maciça. Guia de exigências de durabilidade das madeiras na sua utilização segundo as classes de risco.*

## **5. DETERIORAÇÃO DA MADEIRA**

### **5.1 Generalidades**

Tal como todos os outros materiais de construção a madeira deteriora-se sob a acção de determinados agentes, sendo que a principal diferença em relação a outros materiais de construção não-naturais, é que a madeira por ser um material natural também sofre biodeterioração. Entende-se como biodeterioração a acção de organismos vivos na madeira, que levam à degradação parcial ou completa do material, com o intuito de obtenção de alimentos ou de protecção, entre outras razões. Assim, distingue-se dentro do universo dos agentes causadores de deterioração na madeira dois tipos: os agentes abióticos, que correspondem aos elementos não vivos que provocam a deterioração da madeira, como a chuva, a radiação solar, o fogo; os agentes bióticos, que correspondem aos organismos vivos causadores da biodeterioração, como as bactérias, os bolores, os fungos de podridão e cromogéneos, os insectos xilófagos, e os xilófagos marinhos. Para além destes dois tipos de origem de patologias na madeira, é possível identificar um terceiro tipo, que não se incluindo nas categorias anteriores, faz todo o sentido que exista, até mesmo como forma de distinguir o factor humano de factores que não são controláveis, designando-se por patologias de origem estrutural, como as sobrecargas, secções incorrectas, má execução dos pormenores construtivos, etc.

A utilização da madeira como material de construção em múltiplas funções, como em edifícios, pontes, passadiços em praias, pontões, entre outros exemplos, pode desenvolver uma série de determinadas “patologias” de carácter físico, químico e mecânico, desencadeadas pelos agentes já mencionados. Mais adiante serão apresentados os principais agentes agressivos, bem como a descrição dos efeitos nocivos na madeira.

### **5.2 Agentes Abióticos**

#### **5.2.1 A Água**

A água, através da precipitação, vai degradando a madeira de uma forma muito lenta e, só em condições especiais é que pode realizar danos mais pronunciados. A madeira como material higroscópico, sofre alterações no seu teor em água à superfície, efectuando trocas gasosas com

a atmosfera, isto conduz que quando exposta a chuvas a madeira absorva água nas suas camadas superficiais provocando uma expansão da sua dimensão e, nos períodos de seca e de temperaturas mais elevadas, esta retraia as suas dimensões. Por vezes, a diferença de teor em água entre a camada superficial e a camada interior, originam tensões superficiais, provocando a criação de fendas [5.01]. Para além das fendas, o aumento do teor em água diminui a resistência mecânica da madeira, reflectindo-se na resistência à flexão, no módulo de rotura e, nas resistência à compressão paralela às fibras [5.02].

Também relacionado com a problemática da água nos materiais lenhosos, o efeito do gelo-degelo deve ser considerado, e se o mesmo for repetitivo, pode afectar significativamente a resistência do elemento ao originar a destruição das células superficiais. A água nas cavidades celulares ao passar para o estado sólido provoca um aumento de volume das fibras de madeira (quando no estado verde), produzindo danos físicos no elemento [5.03].

É aconselhável que os elementos de madeira apresentem uma protecção superficial, como um verniz ou pintura (por exemplo), para assim resistirem durante muito mais tempo à acção exterior da água. No caso de não haver incompatibilidade com outras quaisquer razões, sempre que possível os elementos exteriores de madeira devem encontrar-se protegidos da intempérie, sendo necessário algum cuidado na execução de detalhes arquitectónicos que possam por em causa a integridade física da madeira desnecessariamente.

### **5.2.2 A Radiação Solar**

A degradação da madeira pela luz solar desenvolve-se através da actuação dos raios ultravioleta e infravermelhos. A exposição directa dos elementos de madeira à radiação solar origina profundas alterações de cor e textura à superfície devido aos efeitos combinados da luz solar, água e organismos biológicos [5.04]. Os raios ultravioleta apenas actuam à superfície, cerca de alguns  $\mu\text{m}$ , produzindo alterações químicas na camada superficial ou no próprio revestimento superficial (verniz ou pintura).

A alteração química da madeira processa-se através da exposição aos raios ultravioleta, estes quebram as ligações da lenhina (adesivo natural que liga as fibras de madeira), facilitando a lixiviação desta dado a sua fácil solubilização [5.05]. Para além desta ascendem também à



superfície as substâncias extractivas solúveis em água, existentes na própria madeira, logo após as primeiras semanas de exposição solar, provocando na madeira uma coloração amarela ou acastanhada. Com a exposição prolongada as madeiras claras escurecem e as madeiras escuras tendem a branquear (ver Figura 5.1), apresentando mais tarde o aspecto típico da degradação pela radiação solar, i.e., aspecto acinzentado (ver Figura 5.2), de cor baça, conferido pela própria cor da celulose (possui uma cor esbranquiçada). Com a lixiviação da lenhina e das substâncias extractivas, é a celulose que passa a conferir a cor.



Figura 5.1 - Estrutura do passadiço exterior do Picadeiro d'El Rei (Almeida) com alteração da cor original.



Figura 5.2 - Pormenor de uma porta exterior exibindo o aspecto característico da fotodegradação (cor acinzentada e aparecimento do grão) [5.01].

Os efeitos da radiação solar em conjunto com a água, multiplicam e potenciam as consequências danosas à madeira. Após 1 a 2 anos destas acções continuadas, aparecem fissuras microscópicas entre as fibras que posteriormente começam a levantar da superfície, sendo visível o grão (aspecto rugoso e desgastado da superfície da madeira) [5.04].

Por vezes é usual que a camada superficial da madeira se encontre coberta por bolores, alimentando-se estes dos produtos resultantes da fotodegradação e da humidade existente, conferindo uma coloração grisalha ou negra [5.04]. O mecanismo de degradação por radiação solar abranda ao fim de 2 - 3 anos, tornando quase imperceptível o agravamento das condições atingidas [5.01]. A madeira mais susceptível a este tipo de deterioração é a madeira desprotegida, isto é, é a madeira que não possui qualquer revestimento (verniz, pintura, entre outros). Podem-se também considerar outros factores que influenciam a dimensão dos danos, como o clima, a exposição solar (existência ou não de elementos de sombreamento), a espécie de madeira, podendo este último factor estar relacionado com uma série de características da madeira que aumentam a sua resistência aos danos apresentados (a densidade, a espessura dos anéis, pouca percentagem de madeira juvenil, orientação dos anéis, entre outros) [5.01]. É corrente que mesmo as madeiras que se encontram revestidas com tintas ou vernizes, conseguem ser atingidas pelas radiações ultravioleta penetrando através do revestimento e, causando a degradação na superfície por baixo do verniz ou pintura, originando a descolagem do revestimento de protecção ao suporte e a consequente delaminação do revestimento protector [5.02].

Relativamente aos raios infravermelhos, estes desencadeiam uma série de danos resultantes do aquecimento superficial da madeira, conduzindo ao aparecimento de fendas na superfície das faces expostas, bem como a subida de resinas à superfície [5.04]

O teor em água do elemento de madeira depende directamente da temperatura deste, o elemento ao ser exposto aos raios infravermelhos é aquecido superficialmente, perdendo humidade por evaporação na camada superficial e, consequentemente diminuindo o teor em água nessa camada. Como o interior do elemento de madeira encontra-se mais frio, é esta diferença entre o teor em água interior e o da camada superficial que origina tensões, provocando o aparecimento de fendas, ou de microfendas (ver Figura 5.3). O elemento de madeira tende a retrair ao diminuir o teor em água pela acção do aquecimento, sendo a retracção travada pela parte interior do elemento [5.01].

O aparecimento das fendas está relacionado com a espécie de madeira utilizada, nomeadamente com o coeficiente de retracção, característico de cada espécie. Quanto maior for

o coeficiente de retracção maior é a variação dimensional experimentada pelo elemento de madeira, resultando numa maior probabilidade de aparecerem fendas e em maior quantidade [5.01].

Para além da fendilhação, os raios infravermelhos originam outro tipo de danos provocado pelo aquecimento, consistindo na ascensão até à superfície da resina existente no interior da própria madeira. Quanto mais resina as espécies apresentarem mais frequente e mais pronunciado é este fenómeno [5.01].



Figura 5.3 - Pilares exteriores no Picadeiro d'El Rei (Almeida) com fissuração provocada pela exposição à radiação solar.

Deve-se ter em consideração que a madeira mesmo quando possui uma protecção superficial, quando sujeita à acção dos raios infravermelhos o envelhecimento da resina de protecção da madeira é acelerado. Uma opção arquitectónica que pode ser utilizada como forma de minimizar os danos nos elementos de madeira expostos à radiação solar, consiste em evitarem-se exposições orientadas a sul, sudoeste e oeste, sendo a orientação sul a mais gravosa [5.04].

### 5.2.3 O Fogo

O fogo é um dos agentes abióticos que está relacionado na maioria das vezes com causas acidentais. Ao contrário de outros agentes agressivos, que é quase certo o seu aparecimento se se verificarem uma série de determinadas condições, o fogo pode aparecer repentinamente podendo originar a combustão da madeira. O facto da madeira apresentar um excelente

comportamento ao fogo, pode retardar o período de combustão. Os danos provocados pelo fogo, não resultam da combustão da madeira em si mas sim de uma perda de secção associada ao material já carbonizado, visto o fogo de uma forma geral conseguir ser travado antes de consumir totalmente os elementos de madeira. A diminuição da resistência relaciona-se assim com a secção consumida pela combustão, podendo esta ser prevista através das taxas de carbonização.

Para ocorrer a combustão da madeira é necessário existir oxigénio, e é a reacção do oxigénio com os constituintes da madeira, que quando despoletada por uma fonte de ignição induzida ou não induzida, provoca a combustão caracterizada por uma forte reacção exotérmica. A ignição da combustão quando é induzida consiste numa faísca, ou numa chama, surgindo do meio exterior por acção humana ou tendo como origem objectos materiais. A ignição não induzida ocorre quando não existe nenhuma fonte de calor disponível, a combustão é despoletada por convecção ou por radiação de fluxos de calor de um incêndio, ou de outros objectos aquecidos, ou até mesmo por fluxos de energia [5.06].

A combustão da madeira pode dividir-se em 2 etapas, a primeira corresponde à desgasificação, fase relacionada com a libertação inicial de vapor de água, seguida da libertação de gases que podem entrar em combustão caso exista ar em volume suficiente à medida que o carvão vegetal se vai formando. A segunda etapa consiste na combustão do carvão vegetal até se transformar em cinzas (ver Figura 5.4) [5.01].



Figura 5.4 - Vigas de madeira queimadas por fogo (é visível o aspecto carbonizado) (Monteiro de Tibães, Braga).

Uma das características que faz a madeira ser considerada um material com um bom comportamento ao fogo, é o facto da camada carbonizada proteger a madeira interior das temperaturas elevadas. A camada de carvão ao possuir um coeficiente de condutibilidade térmica muito baixo, faz com que a madeira fique protegida das temperaturas elevadas durante mais tempo, retardando assim a desintegração. Para além da baixa condutibilidade térmica, a carbonização superficial inicial provoca o impedimento dos gases contidos no interior da madeira de saírem para o exterior, retardando desta forma o processo de combustão.

Perante o fogo as diversas espécies de madeira reagem de várias formas distintas, sendo influenciadas por uma panóplia de factores [5.07]:

- espécie;
- forma e dimensões das peças;
- existência de fendas e de arestas vivas;
- teor em água;
- densidade;
- tamanho da fonte calorífica;
- o coeficiente de condutibilidade calorífica;
- o calor específico;
- formação do carvão.

Na escolha da espécie face ao comportamento ao fogo devem-se ter em conta algumas características que podem ajudar ao desempenho da madeira. As espécies resinosas por possuírem resinas e azeites são mais facilmente inflamáveis do que as folhosas.

A densidade permite prever a velocidade de combustão da madeira. Quanto mais leves forem as madeiras, quanto maior for o volume dos poros e por conseguinte o volume de ar, mais rápida é a combustão, sendo o tempo de ignição proporcional à densidade da madeira [5.07].

As dimensões e a forma das peças podem ser relacionadas com o ponto de inflamação, quanto maiores forem as dimensões mais retardado é o ponto de inflamação. A forma da superfície tem importância no tempo necessário para começar a arder uma peça, as superfícies rugosas e

angulosas aceleram o alcance do ponto de inflamação ao aumentarem a superfície específica [5.01].

O teor em água da madeira é relevante para a ignição da combustão, pois o processo de combustão desenvolve-se com a evaporação da água, e quanto maior for a quantidade de água presente maior é o tempo necessário para ocorrer a ignição.

O tamanho da fonte calorífica relaciona-se com o facto desta poder possuir ou não energia suficiente para aquecer toda a peça, caso contrário apenas será queimada a zona sobre a qual a fonte de calor encontra-se a incidir.

O coeficiente de condutibilidade calorífica mede a transmissão de calor e a sua propagação a toda a massa de material. No caso da madeira o seu valor é baixo, especialmente na direcção perpendicular às fibras. Em peças de grande secção apenas arde a parte exterior permitindo a preservação do interior. O coeficiente de condutibilidade calorífica pode variar de 0,005 kcal / mh °C (em resinosas) a 0,30 kcal / mh °C (em folhosas).

O calor específico relaciona-se com a necessidade de calor para aquecer o material, para menores dimensões das peças menor é a necessidade de aquecimento do material. A madeira possui baixo calor específico, variando de 0,4 a 0,7 kcal / kg °C, atingindo facilmente os 150 °C [5.01].

A formação de carvão na parte exterior das peças de madeira, funciona como uma barreira térmica retardando o aquecimento das camadas interiores. A velocidade de carbonização da madeira é de aproximadamente 0,7 mm / min (depende da espécie).

#### **5.2.4 Os Compostos Químicos**

Os compostos químicos como os ácidos, sais ácidos, álcalis e sais alcalinos, não são necessariamente nefastos à madeira, esta devido à sua própria constituição possui resistência natural à maioria dos químicos, quer seja por dissolução, ou por qualquer outra forma de degradação.

Em relação aos compostos ácidos a madeira apresenta uma boa resistência sendo capaz de suportar ambientes ácidos até um pH igual 2, destacando-se positivamente em relação ao betão e ao aço que se degradam para valores de pH inferiores a 5. Esta situação não se verifica para os álcalis devido à fraca resistência da madeira aos compostos alcalinos.

A degradação da madeira pelos compostos químicos pode ocorrer de duas formas distintas:

- devido ao aumento do teor em água que provoca a expansão das suas dimensões e por conseguinte a diminuição da resistência mecânica. Esta acção tem um carácter reversível, podendo a madeira recuperar as suas propriedades após a diminuição do teor em água. Este mecanismo ocorre para situações de baixas concentrações de ácidos, álcalis e sais alcalinos. Porém, existem alguns compostos químicos que apenas influenciam as propriedades da resistência mecânica sem alterar as dimensões dos elementos, como por exemplo os óleos obtidos do petróleo e do creosote.
- os ácidos e os álcalis podem provocar alterações irreversíveis na estrutura da madeira. Os ácidos realizam a hidrólise da celulose, levando a uma perda permanente na resistência mecânica, e posteriormente ao ataque a madeira adquire uma coloração castanha escura e uma textura friável. Por sua vez os álcalis e os sais alcalinos provocam a dissolução da hemicelulose e a destruição da lenhina, deixando a celulose praticamente intacta. Com a destruição da lenhina as fibras ficam soltas e friáveis, adquirindo uma coloração esbranquiçada. A profundidade do ataque pode variar para além da superfície, dependendo da duração, do pH e das condições de exposição. A madeira de folhosas é susceptível tanto ao ataque por compostos ácidos como por soluções alcalinas, situação que não se verifica com as resinosas visto serem resistentes tanto aos ácidos como os álcalis.

Uma situação particular das estruturas de madeira são as ligações metálicas, estas quando se encontram corroídas podem degradar a madeira, caso se verifique a existência simultânea de oxigénio e água, para além dos iões ferrosos. Os produtos da corrosão tornam-se de tal forma corrosivos que alteram a coloração do local onde se inserem para além de reduzirem a resistência mecânica do elemento naquele ponto [5.01].

Apesar de possibilidade de degradação da madeira pelos compostos ácidos, o material continua a ser utilizado em bastantes aplicações que se podem considerar de ambientes agressivos,

como são os exemplos dos depósitos de madeira para armazenar o sal, e recipientes para conter soluções químicas.

### **5.3 Agentes Bióticos**

#### **5.3.1 As Bactérias**

As bactérias são microrganismos que podem desenvolver-se na madeira em condições anaeróbias. A degradação da madeira por acção bacteriológica ocorre pela destruição da membrana do lúmen das células, devido ao ataque sobre os componentes das paredes celulares, podendo os danos produzidos serem associados a cada grupo específico de microrganismos [5.08]. A destruição desta membrana proporciona a entrada de água para o interior das células, provocando o consequente aumento do teor em água e, uma maior susceptibilidade a outros agentes agressores.

Os principais géneros de bactérias que se podem encontrar nos elementos de madeira são as *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Clostridium*, e *Alcaligenes*, sendo os mais comuns os géneros *Bacillus* e *Pseudomonas*.

A acção bacteriológica pode apresentar três tipos diferentes de deterioração [5.08]:

- erosão, é provocada pela degradação das camadas das paredes secundárias, apresentando o material residual uma aparência porosa;
- cavitação, consiste no fenómeno de criação de cavidades irregulares localizadas na parede secundária (perpendicularmente à direcção longitudinal das fibras), que na maioria das vezes têm a forma de diamantes.
- criação de túneis, são produzidos por bactérias presentes no interior da parede secundária, podendo por vezes alcançar a parede primária;

Os processos de biodeterioração bacteriológica fornecem pistas relevantes no domínio da arqueologia, nomeadamente na caracterização das condições em que os achados arqueológicos se encontram, por exemplo.

#### **5.3.2 Bolores**

Os bolores consistem em fungos de determinadas espécies, que alteram o seu aspecto superficial. Os bolores propagam-se através de esporos que andam no ar, sendo apenas



necessário para a sua esporulação uma fonte de alimento e um teor em água superior a 18 %. A temperatura ajuda ao crescimento rápido, sendo favorável ao seu desenvolvimento temperaturas mais elevadas.

Os bolores tornam-se visíveis ao olho humano quando aparecem à superfície da madeira os corpos de frutificação ou esporos. Os corpos de frutificação apresentam um aspecto semelhante ao algodão, com uma textura pulverulenta, podendo existir em diversas cores, como o branco, rosa, púrpura, verde, preto, entre outras [5.02].

A principal causa para o aparecimento dos bolores é o teor em água, que quando superior a 18 % torna os elementos susceptíveis. Para além do teor em água, a temperatura elevada e a existência de nutrientes também são factores que influenciam o aparecimento destes organismos.

De uma forma geral, os bolores crescem na superfície da madeira, sendo possível com relativa facilidade a extracção dos mesmos através de escovagem, ou até mesmo com uma simples passagem de um pano.

O aparecimento dos bolores serve de alerta para o facto da madeira encontrar-se com um teor em água elevado, podendo posteriormente desencadearem-se ataques mais severos por parte de outros agentes xilófagos, como fungos de podridão e insectos xilófagos.

### **5.3.3 Fungos de Podridão e Fungos Cromogéneos**

#### **5.3.3.1 Generalidades**

Os fungos são seres vivos que possuem uma estrutura celular muito simples, são incapazes de sintetizar o seu próprio alimento, e alguns fungos podem viver de uma forma parasitária, absorvendo nutrientes produzidos por outros animais ou vegetais com quem possa viver unido.

Tal como todos os seres vivos os fungos desenvolvem-se segundo um ciclo de crescimento que se inicia com os esporos. Os esporos podem permanecer muitos anos nos edifícios sem qualquer tipo de manifestação, resistindo à dissecação, aguardando por condições favoráveis ao seu desenvolvimento, sendo certo que a viabilidade do desenvolvimento é afectada pelo envelhecimento.

Para se conseguir compreender como é que a madeira é afectada pelos fungos de podridão é necessário explicar-se qual a importância da madeira para os fungos. As explicações residem na própria constituição da madeira, em que o componente mais importante da sua constituição é a celulose, e esta consiste num polissacarídeo, ou seja, é um açúcar. A madeira ao possuir açúcar torna-se apetecível aos organismos sob um ponto de vista nutricional, visto estes necessitarem de nutrientes para sobreviver. A celulose é transformada em açúcar solúvel em água através de enzimas produzidas pelos fungos, o mesmo acontece com a hemicelulose. A lenhina, outro composto essencial da constituição da madeira, não apresenta o mesmo valor nutricional que a celulose, visto ser mais difícil de degradar, para além de ser insolúvel em água. Existem alguns fungos que produzem enzimas que conseguem degradar a lenhina de forma a sintetizá-la, como o caso das podridões brancas (do género *Basidiomycetes*), para além de outros organismos como é o caso de bactérias aeróbias, anaeróbias e de fungos anaeróbios [5.08]. Na Figura 5.5, pode-se observar a destruição celular pela acção dos fungos.

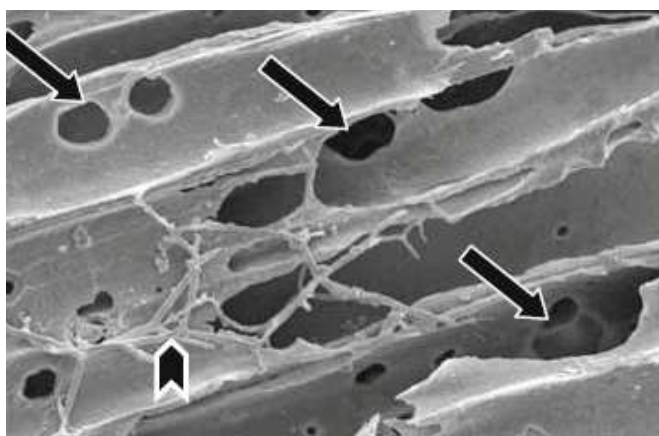


Figura 5.5 - Imagem ao microscópio da destruição dos componentes celulares por fungos de podridão [5.09].

Os fungos podem dividir-se em dois tipos, fungos de podridão e fungos cromogéneos. Por sua vez, os fungos de podridão incluem a podridão branca, a podridão castanha e a podridão mole. A distinção entre os dois tipos de fungos tem a ver com o facto de que os fungos cromogéneos não alteram significativamente a resistência da madeira, afectando apenas a coloração da mesma, ao contrário dos fungos de podridão que conduzem a madeira a uma destruição total. Do ponto de vista da conservação dos elementos de madeira, a identificação exacta da espécie de fungos não é necessária, visto que ao sabermos identificar qual o tipo de fungo conseguimos avaliar o seu potencial destruidor, caracterizando assim o risco envolvido para os elementos existentes.

Nas Figuras 5.6 e 5.7 podem-se observar exemplos de fungos de podridão em soalho e vigas.

Mesmo existindo diversos tipos de fungos de podridão, em que cada tipo possui características particulares, e cujas condições ou requisitos que despoletam o seu aparecimento são comuns a quase todos eles. Para aparecerem as podridões nos elementos de madeira têm que se verificar um conjunto de condições [5.02]:

- *Existência de uma fonte de infestação* – pode acontecer por contágio ao introduzirem - se madeiras já contaminadas. A forma mais usual de infestação consiste na germinação dos esporos espalhados pelo ar;
- *existência de uma fonte de alimento* – a madeira contém substâncias que servem de alimento aos fungos, como a celulose, a hemicelulose e a lenhina;
- *existência de humidade suficiente* – para os esporos germinarem é necessário um teor de humidade para o posterior desenvolvimento dos fungos. O teor de humidade mínimo situa-se entre os 18 e os 20 %;
- *existência de ar* – os fungos não se desenvolvem em madeira submersa, estes necessitam de ar para sobreviverem.
- *existência de uma temperatura adequada* – os fungos necessitam de temperaturas na ordem dos 25 a 32 °C para se desenvolverem de uma forma sustentada. Abaixo dos 0 °C os fungos ficam num estado de dormência. Para temperaturas acima dos 65 °C os fungos morrem.



Figura 5.6 - Fungos de podridão em elementos de madeira.

De todas as condições necessárias, o teor em água é o principal responsável pelo despoletar dos fungos, podendo existir diversas causas possíveis para o aumento do teor em água, tal como infiltrações de água através do contacto com o solo, mau estado de conservação da cobertura ou

inexistência da mesma, rotura de canalizações, ventilação insuficiente ou inexistente no interior do edifício , etc.



Figura 5.7 - Fungos de podridão em elementos de madeira [5.10].

Os fungos de podridão ao instalarem-se na madeira levam a uma diminuição da resistência mecânica dependendo da duração do ataque, da durabilidade natural da madeira e, da existência ou não de algum tratamento com produto preservador, de acordo com a classe de risco a que está exposto.

A acção erosiva dos fungos verifica-se pela alteração da cor da madeira, ou pelo aparecimento de micélios ou corpos de frutificação (ver Figura 5.8), ou pela própria degradação do material apresentando um aspecto fibroso e pulverulento, ou apresentando fissuração longitudinal e transversal, ou pela presença de insectos xilófagos que os acompanham, tal como se verá mais adiante [5.04].



Figura 5.8 - Corpos de frutificação à superfície da madeira [5.11].

### 5.3.3.2 Fungos de Podridão

#### 5.3.3.2.1 Podridão Branca

A podridão branca ou fibrosa é realizada por fungos que crescem no interior das cavidades celulares da madeira, e atacam todos os constituintes das paredes celulares. Eliminam essencialmente a hemicelulose e a lenhina, restando a celulose como componente residual que confere a cor branca à massa de fibras. É característico o aspecto de uma massa de fibras de cor branca ou creme, apodrecidas e viscosas (ver Figura 5.9). É comum que a zona atacada da madeira se encontre delimitada por finas linhas de cor castanha escura [5.04]. Este tipo de podridão desenvolve-se geralmente em madeiras folhosas, podendo também aparecer em resinosas, afectando a capacidade resistente da madeira que se reflecte na diminuição da resistência à tracção [5.08]. Alguns fungos do género *Basidiomycetes* é que provocam a podridão branca, sendo as espécies mais comuns o *Coriolus versicolor*; *Trametes versicolor*; *Fomes igniarivos* e *Phanerochaete chrysosporium* [5.05 ; [5.04].



Figura 5.9 - Podridão branca da espécie *Phanerochaete chrysosporium* [5.12 ; 5.13].

#### 5.3.3.2.2 Podridão Castanha

A podridão castanha também pode ser designada por podridão cúbica, relacionando-se esta designação com o aspecto de pequenos cubos ou prismas, que os elementos de madeira podem apresentar (ver Figura 5.10) [5.04]. As fracturas em forma de cubos ou prismas formam-se com a secagem da madeira após a acção dos fungos de podridão castanha, conseguindo-se desagregar a madeira entre os dedos com alguma facilidade.

Os fungos de podridão castanha produzem enzimas que consomem a celulose e a hemicelulose das células, deixando quase intacta a lenhina, sendo esta última a responsável pela coloração castanha escura típica deste tipo de podridão [5.05]. A podridão castanha é mais usual nas



madeiras resinosas, apesar de não ser exclusivo.



Figura 5.10 - Fracturas em forma de cubos e prismas originadas por podridão castanha [5.14 ; 5.15].

Devido aos compostos sintetizados pelos fungos, esta podridão favorece o aparecimento de insectos xilófagos, nomeadamente algumas espécies de caruncho [5.04]. A podridão castanha pode conduzir à destruição total da madeira através da redução da resistência mecânica de aproximadamente 90 %. As espécies de fungos de podridão castanha mais usuais de serem encontrados em edifícios são a *Serpula lacrymans*, *Gleophyllum trabeum*, *Poria placenta* e *Poria vaillantii* (ver Figura 5.11) [5.02].



a)

b)

Figura 5.11 - Podridão castanha: a) espécie *Fibroporia vaillantii* [5.16] ; b) espécie *Poria placenta* [5.17].

#### 5.3.3.2.3 Podridão Mole

A podridão mole (“soft rot”, na literatura anglo-saxónica) é produzida por fungos por vezes referidos como microfungos. A podridão mole normalmente encontra-se em elementos de madeira muito húmidos e com elevada humidade relativa do ar, em locais com elevado pH, ou quando existe pouca quantidade de oxigénio, ou quando estão presentes extractivos e substâncias que inibem a colonização. É favorecida por elevadas concentrações de compostos de nitrogénio solúvel e por temperaturas elevadas.

A podridão é identificada pelo aspecto de fracturas em cubos, com uma coloração acastanhada ou acizentada, em que a textura amolecida provocada pela grande perda de resistência assemelha-se a um “queijo fresco” (ver Figura 5.12) [5.02 ; 5.04].

A podridão mole é mais facilmente encontrada em folhosas. As espécies mais comuns são do género *Ascomycetes*, *Chaetomium globosum*, *Paecilomyces*, e *Allescheria terrestris* [5.02 ; 5.08].



Figura 5.12 - Podridão mole provocada pela espécie *Chaetomium globosum* [5.18].

#### 5.3.3.3 Fungos Cromogéneos

Os fungos cromogéneos têm um efeito exclusivamente visual nos elementos de madeira, afectando a coloração da madeira geralmente para um tom azulado e, alterando a permeabilidade aos líquidos reflectindo-se no aumento da higroscopicidade da madeira [5.04]. Por vezes a própria madeira pode apresentar alterações cromáticas originadas por ferramentas utilizadas no abate e no corte, mas a grande maioria das situações deve-se à acção dos fungos cromogéneos.

A degradação por fungos cromogéneos é produzida pela descoloração da madeira do borne, produzindo alterações cromáticas que podem ser rosáceas, azuladas ou acinzentadas. O tom rosáceo pode ser encontrado em algumas coníferas, no estado inicial de um ataque por fungos cromogéneos pertencentes ao género *Basidiomycetes*. As alterações azuladas são as mais comuns de aparecer no borne das coníferas (ver Figura 5.13), nomeadamente em espécies de pinho devido aos géneros *Ascomycetes* e *Cestotocystis*. Por último as alterações acinzentadas são típicas de madeira de faia (pasma da madeira de faia), principalmente devido ao género *Ascomycetes*.

As acções dos fungos cromogéneos podem fazer-se sentir em profundidade ou mais à superfície. As acções à superfície são desencadeadas por espécies dos géneros *Deuteromycetes* e *Ascomycetes*, nomeadamente a espécie *Trichoderma lignorum*, que ataca principalmente madeiras resinosas. As acções em profundidade são desenvolvidas pelos géneros *Aspergillus* e *Penicillium*, estes penetram nas células de parênquima e extraem os nutrientes existentes, propagando o ataque ao longo do borne.



Figura 5.13 - Fungos cromogéneos de tom azulado [5.01].

### 5.3.4 Os Insectos Xilófagos

#### 5.3.4.1 Carunchos

Os carunchos são insectos que pertencem à ordem dos *Coleóptera*, e caracterizam-se por serem insectos de ciclo larvar. Alimentam-se dos componentes celulósicos que fazem parte da constituição da madeira.

O ciclo de vida dos carunchos desenvolve-se segundo quatro etapas, ou estados: ovo, larva, pupa e adulto.

- *O estado do Ovo* – as fêmeas depositam os ovos em fendas ou orifícios existentes na superfície da madeira, eclodindo alguns dias depois [5.05].
- *O estado larvar* – após a eclosão dos ovos, as larvas, pequenos indivíduos de poucos milímetros, penetram para o interior da madeira onde podem permanecer de alguns meses até anos [5.02].
- *A pupa* – com a aproximação do final do ciclo de vida a larva desloca-se para a superfície, e cria uma câmara totalmente isolada (câmara pupal), até atingir a sua transformação. Nesta fase a larva deixa de se alimentar.



- *O adulto* – atingindo-se a metamorfose do indivíduo em adulto, o insecto rompe a fina película de madeira da câmara pupal e abandona a madeira para o exterior. Neste momento ainda não se encontra amadurecido visto ainda não ter a função reprodutora desenvolvida. Ao fim de algumas horas após abandonar a câmara pupal, o insecto fica com a sua coloração definitiva, sendo o resultado um adulto totalmente formado [5.02].

Todos os insectos pertencentes à ordem dos *Coleóptera* desenvolvem-se segundo este ciclo de crescimento, a duração do ciclo depende de cada espécie e, acima de tudo depende dos factores externos como a temperatura e a humidade. O teor em água é um dos factores que podem condicionar a existência de determinadas espécies de insectos, isto é, existem espécies que atacam madeiras com teores em água inferiores, outras atacam madeiras teores em água mais elevados e, em certos casos, existem espécies que atacam perante qualquer teor em água. Os insectos dependem muito da temperatura, estes não conseguem controlar a temperatura do seu corpo [5.04]. Todas as alterações de temperatura do meio envolvente produzem alterações no metabolismo dos *Coleóptera*, tanto pode inibir a actividade destes, como pode estimá-la. Os valores de temperatura óptimos são diferentes para cada espécie.

Os danos produzidos pelos carunchos podem ser bem visíveis, sendo detectado facilmente a degradação por estes insectos (ver Figuras 5.14 e 5.15). A dificuldade existe relativamente à distinção da espécie de caruncho presente no elemento de madeira. A maioria das vezes os insectos permanecem invisíveis, daí exista um conjunto de evidências, as quais se apresentam em seguida [5.02]:

- forma e diâmetro dos orifícios de saída; os orifícios podem ser circulares ou elípticos, podendo ter diâmetros desde 1mm até 20 mm;
- presença ou ausência de detritos nas galerias;
- direcção e forma das galerias existentes no interior da madeira;
- o tipo de madeira atacada (borne ou cerne);
- espécie de madeira;
- o teor em água da madeira;
- a forma da madeira digerida ou do serrim, ou dos excrementos que podem ser encontrados nas galerias.



Figura 5.14 - Aspecto de vigas de madeira atacadas pelo caruncho.



Figura 5.15 - Degradação da superfície da madeira devido à infestação por caruncho.

A seguir serão apresentadas as espécies de carunchos mais usuais na Europa, salientando-se as características mais relevantes para a identificação das espécies em madeiras atacadas.

#### a) Os *Anobidae*

Os anóbidos são conhecidos por carcoma, os seus ataques centram-se em móveis antigos e, em elementos de estruturas de madeira. Tanto podem afectar madeiras resinosas como folhosas. A madeira do borne geralmente é a mais atacada, possuindo um certo teor em água. As espécies mais representativas são o *Xestobium rufovillosum* e o *Anobium punctatum*.

##### a.1) *Xestobium rufovillosum*

##### a.1.1) Caracterização Física

Na literatura anglo-saxónica o *Xestobium rufovillosum* designa-se por “Death watch beetle”, que significa relógio da morte. O nome foi atribuído pois era usual ouvir-se nos tribunais o som repetido do *Xestobium* enquanto as pessoas julgadas eram sentenciadas à morte [5.02]. O som

consiste no resultado de na época do acasalamento darem cinco golpes seguidos na superfície da madeira, fazendo uma pausa e voltando a repetir consecutivamente.

Os insectos adultos possuem uma coloração acastanhada ou esbranquiçada, podendo ter entre 6 a 11 mm de comprimento (ver Figura 5.16).



Figura 5.16 - Insecto adulto *Xestobium rufovillosum* [5.19].

#### a.1.2) Condições Necessárias

As madeiras com elevado teor em água são mais facilmente atacadas. A madeira de folhosas, como o carvalho, o salgueiro, a faia e a nogueira, podem ser atacadas na parte do borne e do cerne caso a madeira se encontre previamente atacada por fungos de podridão [5.05]. As resinosas são atacadas caso estejam em locais em que existam infecções activas em folhosas.

#### a.1.3) Identificação do Ataque

O borne é preferencialmente atacado, enquanto que o cerne só é atacado se tiver sido previamente degradado por fungos de podridão.

O ataque do *Xestobium rufovillosum* pode ser identificado pela presença de serrim em forma de disco, presente no interior das galerias. Ao esfregar-se o serrim por entre os dedos este apresenta um toque arenoso [5.05].

Os orifícios de saída são circulares de aresta bem definida, com diâmetros entre os 2 a 4 mm, apesar de por vezes poderem ser maiores. As galerias no interior da madeira normalmente são paralelas às fibras, no entanto é possível que tomem outras direcções. O diâmetro dos orifícios das galerias varia entre 2 a 4 mm [5.01].

Após a ataque deste insecto a madeira apresenta um aspecto fibroso, desagregando-se facilmente.

#### a.2) *Anobium punctatum*

##### a.2.1) Caracterização Física

O *Anobium punctatum* também é conhecido por carcoma pequeno e, na literatura anglo-saxónica designa-se por “furniture beetle” ou “woodworm”. Os insectos adultos têm uma coloração castanha escura e, possuem um comprimento entre 3 a 5 mm (ver Figura 5.17) [5.01].



Figura 5.17 - Insecto adulto *Anobium punctatum* [5.20].

As larvas podem alcançar um comprimento de 6 mm, normalmente têm forma curva, e como característica particular apresentam uma franja negra que envolve a sua boca.

##### a.2.2) Condições Necessárias

Esta espécie ataca quase todas as madeiras, com preferência pela madeira do borne. O cerne só é atacado quando este tiver sido previamente infectado por fungos de podridão. O *Anobium punctatum* não requer um teor em água elevado, necessitando apenas de um teor em água mínimo de 12 % para produzir o ataque [5.01]. Alimenta-se de leveduras depositadas pelas fêmeas que são extremamente essenciais à sua nutrição. Acima dos 26 °C as leveduras morrem, condicionando assim a sobrevivência do insecto [5.05].

##### a.2.3) Identificação do Ataque

Uma das características do ataque do *Anobium punctatum* é que este não faz barulho ao digerir a madeira, ao contrário de outros carunchos.

Os orifícios de saída têm forma circular, e possuem cerca de 1 a 3 mm de diâmetro. Quando os orifícios de saída são recentes, o interior dos mesmos apresenta uma cor de madeira verde, escurecendo com o passar do tempo [5.01]. As galerias também possuem uma forma circular, com um diâmetro de cerca de 2 mm e, podem seguir qualquer direcção.

O serrim do *Anobium punctatum* é muito particular, assemelha-se à forma dos limões, para além disso é vasto e quando sujeito ao toque é aspro. Normalmente as galerias encontram-se cheias de serrim, encontrando-se o mesmo solto no interior destas.

É muito raro ocorrer o ataque deste insecto em coberturas, tal como em madeiras existentes no interior de edifícios climatizados [5.02]. A preferência dos ataques recaem sobre madeiras velhas e secas e, em pequenas peças de esquadrias de com elevado teor em água. Pode acontecer que a madeira apesar de estar fortemente atacada exiba poucos orifícios de saída, isto explica-se com o facto destes insectos não necessitarem de sair para o exterior para depositar os ovos. O tamanho do insecto não traduz a destruição que este pode fazer na madeira (ver Figura 5.18). Usualmente podem-se observar insectos mortos no pavimento e junto às janelas [5.05].



Figura 5.18 - Dano provocado pelo *Anobium punctatum* [5.21]

#### b) Os *Cerambycidae* (cerambícidos)

Os cerambícidos são conhecidos por caruncho grande. É frequente encontrarem-se ataques desta família em estruturas de madeira em coberturas. Normalmente atacam apenas a madeira do borne em folhosas e em resinosas. As espécies mais representativas desta família são o *Hylotrupes bajulus*, o *Ergates faber* e o *Hespherophanes cinereus*.

### b.1) *Hylotrupes bajulus*

#### b.1.1) Caracterização Física

O *Hylotrupes bajulus* é designado por “house longhorn beetle” na literatura anglo-saxónica. O nome foi-lhe atribuído devido às longas antenas que possui. As fêmeas adultas podem atingir os 25 mm de comprimento, e os machos normalmente têm entre 10 a 20 mm, apresentando uma coloração negra e, na região do tórax possuem um conjunto de pêlos cinzentos esbranquiçados na zona dorsal [5.22] (ver Figura 5.19).



Figura 5.19 - Insecto adulto *Hylotrupes bajulus* [5.23].

#### b.1.2) Condições Necessárias

O *Hylotrupes bajulus* ataca essencialmente madeiras de resinosas, não afectando as folhosas. Estes insectos na sua maioria atacam as madeiras verdes não serradas. Em edifícios, estes insectos toleram teores em água bastante inferiores, cerca de 10 a 14 %. Atacam quase exclusivamente a madeira do borne, em espécies que quase não possuem cerne, como o abeto, a destruição dos elementos é quase total. [5.01]. Estes insectos não voam com temperaturas abaixo dos 25 °C, sendo a temperatura óptima 30 °C.

#### b.1.3) Identificação do Ataque

O *Hylotrupes bajulus*, quando no estado larvar, emite um ruído característico ao criar galerias, ou quando os insectos adultos perfuram a madeira para a abandonar [5.22]. Uma forma simples de se identificar o ataque desta espécie é pela forma elíptica dos orifícios de saída, podendo ter uma largura de 6 a 10 mm. O ataque desta espécie pode ser bem destruidor.

As galerias executadas pelas larvas seguem a direcção das fibras, encontrando-se cheias de serrim e, com as paredes marcadas ou apresentando estrias [5.01]. Uma das degradações

apresentadas pela madeira é o enrugamento da superfície das peças (ver Figura 5.20).

Relativamente ao serrim produzido, é vasto, farináceo, de forma cilíndrica e, não é expulso para o exterior. Ocorre a acumulação do serrim nas galerias devido a estas estarem tapadas na extremidade à superfície, por uma fina película de madeira.



Figura 5.20 - Ataque de uma peça de madeira pelo *Hylotrupes bajulus* (são visíveis os orifícios elípticos e o enrugamento da superfície) [5.23].

#### c) Os *Lictidae* (*líctidos*)

Os líctidos têm pequena dimensão e atacam preferencialmente a madeira do borne das folhosas, sendo necessário que possua um determinado conjunto de requisitos para a infestação ocorrer, como possuir um diâmetro dos vasos apropriado para a deposição dos ovos e, uma determinada quantidade de amido. As espécies de madeira mais afectadas são o carvalho, o freixo e o olmo. As espécies como a faia e o choupo não são atacadas por esta espécie [5.01].

As espécies dos *Lictidae* mais comuns são a *Lyctus brunneus* e a *Lyctus linearis*, sendo a primeira a mais usual.

##### c.1) *Lyctus brunneus*

###### c.1.1) Caracterização Física

Os insectos adultos da espécie *Lyctus brunneus* ("powder post beetle", na literatura anglo-saxónica), têm um corpo estreito, alongado, com um comprimento que varia entre 2 e 7 mm, possuindo uma coloração castanha avermelhada ou castanha escura (ver Figura 5.21) [5.22].





Figura 5.21 - Insecto adulto *Lyctus brunneus* [5.24].

#### c.1.2) Condições necessárias

Esta espécie só ataca madeira do borne de folhosas com elevada percentagem de amido, superior a 3 % [5.05]. É comum o *Lyctus brunneus* atacar tanto as madeiras existentes em edifícios, como as árvores recém abatidas [5.22]. As madeiras atacadas apresentam teores em água inferiores a 18 % [5.01].

#### c1.3) Identificação do Ataque

A espécie *Lyctus brunneus* perfura o borne da madeira de folhosas produzindo um serrim fino, de cor branco-creme, idêntico à farinha ou a pó-talco, sedoso ao toque. O serrim está contido no interior das galerias por uma fina película de madeira à superfície [5.05]. É característico desta espécie não formar bolas de serrim, acumulando-o no interior das galerias, expandindo-se até originar a rotura da película de madeira. O serrim por ser tão fino, com as vibrações dos elementos pode sair facilmente e aparecer por baixo dos orifícios de saída, assinalando de uma forma visível a presença do ataque por caruncho [5.01]. A superfície explodida é uma forma de identificação da degradação por *Lyctus brunneus*, bastando para o efeito uma lente de mão que ajuda a confirmar a ausência de serrim [5.05].

Os orifícios de saída têm forma circular e, um diâmetro de 1 a 2 mm [5.01]. Os orifícios que possam aparecer na zona da madeira do cerne não correspondem a um ataque efectuado, mas sim à passagem dos insectos adultos para o exterior [5.22].

Uma situação curiosa e que funciona como um dado relevante na identificação do ataque é a idade do elemento. É conhecido que com o passar do tempo as madeiras de folhosas tornam-se mais resistentes à infestação por *Lyctus brunneus*, e caso não tenham sido infestadas durante



15 anos, será quase garantido a futura imunidade da madeira a esta espécie [5.01].

d) Os *Curculionidae* (curculiónidos)

Os curculiónidos são insectos de pequena dimensão, que atacam resinosas e folhosas. Estes insectos nunca atacam a madeira sã, por esse motivo são considerados uma peste secundária [5.05]. As espécies mais usuais que podem ser encontradas em edifícios são a *Hexarthrum exiguum*, a *Pselactus spadix* e a *Amaurorrhinus bewickianus* [5.01].

d.1) *Hexarthrum exiguum*

d.1.1) Caracterização Física

A família *Curculionidae*, também conhecidos por gorgulhos, ou por “wood boring weevils” na literatura anglo-saxónica, apresentam uma característica particular, a sua cabeça prolonga-se em frente dos olhos, constituindo um focinho bem definido. Os insectos adultos possuem um corpo cilíndrico com cerca de 3 a 5 mm de comprimento, de cor castanha escura (ver Figura 5.22)) [5.05]. As larvas têm um comprimento de 3 mm, sendo facilmente identificáveis por uma mancha negra característica na cabeça [5.01].

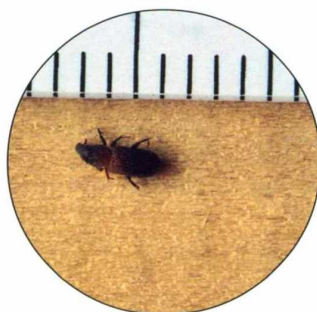


Figura 5.22 - Insectos *Curculionidae* adulto [5.01].

5.3.4.2 Térmitas

As térmitas são insectos que pertencem à ordem dos *Isoptera*, e são também conhecidas por formigas brancas (ver Figura 5.23). As térmitas vivem de forma social, em colónias, numa hierarquia em que cada indivíduo possui funções específicas.



Figura 5.23 - Térmitas da espécie *Reticulitermes lucifugus* [5.25].

Existem cerca de 2800 espécies de térmitas, das quais a grande maioria é originária das zonas tropicais, mas apenas cerca de 80 espécies é que provocam danos relevantes na madeira [5.22]. O ataque das térmitas é responsável por um prejuízo económico muito elevado em muitos países do mundo.



Figura 5.24 - Aspecto de elementos de madeira atacados por térmitas [5.27].

As térmitas alimentam-se de componentes celulósicos existentes em muitos materiais, como a madeira, as plantas, o algodão, entre outros. Por vezes, constata-se que estas atravessam objectos constituídos por materiais de diferentes tipos, como o plástico ou borracha, como é o caso dos cabos de telecomunicações. Estes materiais não são digeridos, são apenas mastigados e expelidos, tendo a acção o objectivo de eliminar um possível obstáculo ao trajecto das térmitas [5.05].

As térmitas são seres vivos, e como tal, o seu aparecimento nos elementos de madeira verifica-se porque foi proporcionado ao insecto um conjunto de factores que garantiram condições favoráveis ao seu aparecimento e desenvolvimento. Os factores ou requisitos mais relevantes para o aparecimento das térmitas são:

- quantidade suficiente de celulose (é obtida pela quantidade de madeira, papel, tecidos, entre outros);
- elevada humidade relativa do ar e necessidade de um teor em água mínimo na madeira;
- temperaturas relativamente elevadas (com o crescente aumento da utilização de aquecimento no interior dos edifícios, aumenta a presença das térmitas nos mesmos).

Em Portugal é possível encontrarem-se térmitas em todos os distritos do continente, bem como nas Ilhas da Madeira e Açores. As espécies mais usuais são a *Reticulitermes lucifugus* (da família *Rhinotermitidae*), a *Cryptotermes brevis* (da família *Kalotermitidae*), e a *Kalotermes flavicollis* (da família *Kalotermitidae*) [5.28].

É notório o aumento da população de térmitas em ambientes urbanos, isto poderá estar relacionado com a generalização dos factores anteriormente referidos (níveis de humidade, quantidade de alimento, entre outros), bem como factores de ordem geológica e geográfica. Segundo Nunes [5.28], um estudo efectuado à distribuição geográfica das térmitas no território nacional, concluiu que existe uma maior probabilidade destes insectos serem encontrados em áreas de grande densidade populacional, com boa exposição solar e em locais com muitos dias de chuva. Curiosamente, os solos rochosos são particularmente atractivos às térmitas [5.28].

As térmitas podem ser divididas em três tipos ou categorias, térmitas subterrâneas, térmitas de madeira seca e térmitas de madeira húmida.

#### a) Desenvolvimento das Colónias

O desenvolvimento das colónias é comum aos três tipos de térmitas, diferindo apenas nos locais em que as colónias se desenvolvem. O ciclo de vida de uma colónia começa quando na Primavera um enxame de indivíduos sexuais abandona a colónia. Estes indivíduos têm a capacidade de voar e, efectuam um voo de curta duração, geralmente até à distância de algumas centenas de metros, formando a nova colónia.

Os ovos depositados pela rainha ao eclodirem convertem-se em ninfas, estas têm a capacidade

de reproduzir indivíduos de diferentes castas (ou tipos), de forma a dar início à organização social da colónia, que se divide da seguinte forma:

- reprodutores (indivíduos sexuais), distingue-se o par real dos pares secundários (neotécnicos de substituição), e dos indivíduos alados reprodutores que podem abandonar o ninho para criar outro;
- soldados; são cegos e têm grande sensibilidade à luz devido ao facto de não possuírem pigmentação no seu corpo, não podem portanto estar expostos à luz podendo morrer caso o façam. Têm como função garantir a defesa da colónia, estando habilitados para o efeito pelas grandes mandíbulas que possuem, bem como pelas glândulas para produção de secreções pegajosas;
- obreiras; têm como função procurar alimento e alimentar todos os indivíduos da colónia, bem como construir, limpar e reparar o ninho. Tal como os soldados, as obreiras não possuem visão nem pigmento no seu corpo. As obreiras decompõem a celulose da madeira em açúcares assimiláveis, que transportam até aos outros indivíduos da colónia.

Na Figura 5.25 pode-se observar os diversos tipos de castas existentes numa colónia de térmitas, e as ligações de dependência entre eles.

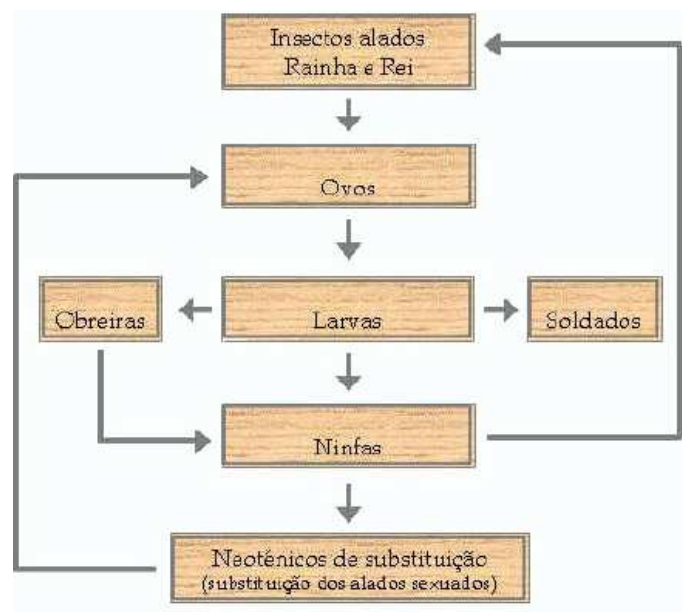


Figura 5.25 - Os diversos tipos de castas e as relações entre si numa colónia de térmitas [5.10].

Na Figura 5.26 pode-se observar um exemplo de uma térmita reprodutora da espécie

*Reticulitermes lucifugus*.



Figura 5.26 - Térmita reprodutora da espécie *Reticulitermes lucifugus* [5.29].

Segundo Ridout [5.05], as térmitas teoricamente são imortais, já que os ninhos possuem a capacidade de se auto-regenerarem. Existe, portanto, uma reprodução continuada, fazendo com que a colónia tenha uma população sempre adequada às necessidades de alimento e desenvolvimento da colónia. As colónias podem ser bastante numerosas, alojando milhões de indivíduos e, tendo sido iniciadas por um simples par de indivíduos [5.05].

#### b) Térmitas Subterrâneas

A designação de térmitas subterrâneas é-lhes atribuída pela localização das colónias no solo, junto de árvores ou edifícios. Os insectos adultos têm um comprimento entre 1 a 4 mm, com uma coloração branca ou marfim (ver Figura 5.27).

Através do solo penetram subterraneamente nos edifícios, para obter alimento, regressando novamente ao ninho que se encontra no solo. As construções mais sujeitas à acção das térmitas subterrâneas encontram-se muito próximas do solo, mal ventiladas e sem drenagem ao nível das caves ou fundações. As térmitas subterrâneas são o tipo de térmitas mais comum na Europa.

As térmitas subterrâneas dissecam muito rapidamente, daí a necessidade de permanecerem em ambientes húmidos que as protejam dos efeitos da secagem ao ar [5.05]. A sua elevada sensibilidade à luz faz com que se desloquem através de galerias de forma tubular, onde por vezes no seu interior é possível encontrar-se terra húmida colocada pelos insectos. Deslocam-se sempre em fila, guiadas pelo olfacto que possuem nas antenas.

A actividade das térmitas é condicionada quer por factores ambientais, quer pelas características da madeira. A temperatura óptima para a infestação aproxima-se dos 30 °C [5.01]. Necessitam de elevados valores de humidade relativa do ar, entre 95 a 100 %, muito perto do ar saturado. Relativamente ao teor em água da madeira, as térmitas não toleram valores elevados, sendo raro atacarem elementos nessas condições, como é o caso de estruturas de madeira em coberturas (por exemplo).

Os danos provocados pelas térmitas podem ser bastante devastadores, podendo levar os elementos de madeira ao colapso. Na grande maioria das vezes os danos não são visíveis, até se tornarem identificáveis por situações mais gravosas, como grandes perdas de secção (originando perda de capacidade resistente). Sendo assim, é muito importante tentar-se identificar a presença de térmitas pela avaliação do som, um som oco do elemento de madeira quando sujeito a uma pancada, pode revelar a existência das galerias das térmitas, ou a perda de massa. Quando possível, a visualização das galerias também nos poderá indicar a presença de térmitas. Para além das características já referidas, a madeira atacada por térmitas adquire um aspecto muito particular, apresentando-se a madeira de forma laminada, assemelhando-se a folhas de um livro (ver Figura 5.28).



Figura 5.27 - Térmitas obreiras [5.30 ; 5.31].

As galerias formadas pelas térmitas normalmente têm direcção paralela às fibras, ficando ocultas por uma simples camada de madeira muito superficial, com 2 mm de espessura. Outra forma de se comprovar a sua existência é pela identificação de indivíduos voadores, estes poderão alertar para a presença de térmitas, apesar de também existirem formigas voadoras mas estas são facilmente distinguíveis das térmitas. Para além do referido, a presença das térmitas também pode ser verificada através da existência de nós resistentes no interior da



madeira semelhantes a massa de barro [5.01].



Figura 5.28 - Danos resultantes de um ataque por térmitas conferindo o aspecto semelhante a folhas de um livro [5.01].

Um aspecto muito curioso, é que estas térmitas nunca atacam elementos de madeira que possam ter alguma mobilidade, como portas, janelas e mobiliário.

As espécies de térmitas subterrâneas mais comuns são a *Reticulitermes lucifugus*, a *Reticulitermes santonensis* e *Reticulitermes flavipes* (ver Figura 5.29).



a)

b)

Figura 5.29 - Térmitas: a) espécie *Reticulitermes santonensis* [5.32] ; b) espécie *Reticulitermes flavipes* [5.33]

### c) Térmitas de Madeira Seca

As térmitas de madeira seca têm a capacidade de viver no interior de madeira seca, admitindo um teor em água máximo de 15 % [5.01], conseguindo assim estar totalmente ausentes do solo, sem qualquer necessidade de acesso ao mesmo.

Uma das espécies mais usuais deste tipo de térmitas é a *Cryptotermes brevis*. As larvas desta espécie possuem aproximadamente 1 mm de comprimento, têm coloração branca e são um pouco translúcidas. Os insectos adultos reprodutores possuem um corpo com cerca de 7 mm de

comprimento e, se incluirmos as asas poderão atingir 11 mm.

É característico da espécie *Cryptotermes brevis* não atacar elementos de madeira em zonas de clima frio, funcionando nestes casos a baixa temperatura como um factor inibidor.

A reprodução dos indivíduos da colónia é muito mais lenta do que nas térmitas subterrâneas, e geralmente não ultrapassam as centenas de indivíduos. Por este motivo, é corrente que o ataque destas térmitas possa demorar alguns anos para fazer-se notar, nos primeiros anos o número de indivíduos não é suficiente para provocar danos severos.

A identificação do ataque por térmitas de madeira seca pode ser efectuado pela observação de danos efectuados à madeira, como a perda de secção, som oco, galerias visíveis, pela visualização de asas soltas ou excrementos fecais com forma hexagonal (ver Figura 5.30).



Figura 5.30 - Excrementos fecais de térmitas *Cryptotermes brevis* [5.34].

Os excrementos destas térmitas são expulsos para o exterior da madeira através de pequenos orifícios, e a confirmação da existência de excrementos novos leva a que se possa identificar se o ataque se encontra activo. Deve-se para isso limpar os excrementos existentes em redor dos orifícios e, uns dias mais tarde deve-se ir ao local verificar o aparecimento de excrementos [5.28]. Raramente é possível visualizarem os orifícios de entrada das térmitas, estes normalmente encontram-se tapados por secreções que formam uma fina película, tornando imperceptível os mesmos.

Na Figura 5.31, podem-se observar as galerias escavadas pelas térmitas na zona da madeira do borne, deixando intacta a madeira do cerne.





Figura 5.31 - Galerias produzidas por *Cryptotermes brevis* (verifica-se a zona do cerne intacta) [5.34].

Os danos resultantes da acção destas térmitas são semelhantes aos provocados pela espécie *Reticulitermes lucifugus*, exibindo as mesmas características de degradação (aspecto semelhante a folhas de livro, por exemplo).

De uma forma geral, as térmitas de madeira seca podem atacar móveis, molduras de quadros, vigas de cobertura, entre outros. Não existem factos documentados acerca de infestações destas térmitas em árvores mortas ou tocos existentes no solo, daí pensar-se que as mesmas provavelmente não atacam este tipo de elementos [5.01].

#### d) Térmitas de Madeira Húmida

As térmitas de madeira húmida são térmitas que necessitam de teores em água elevados, motivo pelo qual atacam árvores vivas penetrando para o seu interior através de pequenas fendas, alcançando o tronco, o cerne, os ramos e as raízes [5.34]. Podem também aparecer em velhos tocos de árvores, ou em pedaços de madeira enterrados no solo. A espécie de térmitas de madeira húmida mais usual é a *Kaloterms flavicollis*. Os indivíduos desta espécie têm um comprimento entre 5 a 10 mm, possuindo uma coloração castanha.

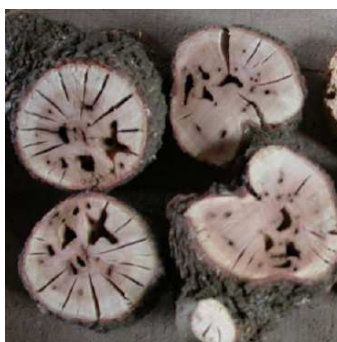


Figura 5.32 - Cerne de árvores atacado por *Kaloterms flavicollis* [5.34].

Uma das situações que distingue esta espécie da *Cryptotermes brevis* (térmitas de madeira seca), é que esta espécie mantém os excrementos fecais no interior das galerias. Os excrementos fecais caracterizam-se por serem de cor negra ou castanha, possuem alguma humidade, e encontram-se muitas vezes formando um conjunto em forma de bola [5.13] (ver Figura 5.33).



Figura 5.33 - Excrementos fecais de térmitas *Kaloterme flavicollis* [5.34].

#### 5.3.4.3 Formigas Carpinteiras

As formigas carpinteiras são insectos maiores do que as formigas comuns, têm entre 18 a 35 mm de comprimento, possuem uma coloração castanha escura ou negra (ver Figura 5.34).



Figura 5.34 - Formiga carpinteira [5.01].

Normalmente, as madeiras não tratadas são atacadas, existindo uma preferência por madeiras brandas, ou por madeiras previamente atacadas por fungos de podridão. As infestações verificam-se em árvores recém-abatidas, em postes danificados, em árvores vivas, em troncos, e em madeira estrutural no interior dos edifícios.

O aparecimento deste insecto no interior dos edifícios pode ocorrer pela emergência de indivíduos adultos de dentro dos elementos de madeira introduzidos no edifício, ou pelo seguimento dos trilhos em busca de abrigos [5.06].

As formigas carpinteiras necessitam de teores em água elevados, situação normalmente despoletada por alguns factores como infiltrações de água, proximidade e contacto com o solo, ventilação insuficiente ou inexistente, ausência de drenagem ao nível das fundações, entre outras.

Ao contrário de outros insectos, estas introduzem-se na madeira apenas para formarem os seus ninhos, ou abrigos e, por vezes, como os edifícios encontram-se aquecidos, originam que as mesmas permaneçam em actividade o ano inteiro, evitando assim o período de hibernação [5.35].

A degradação da madeira ocorre devido às galerias que estes insectos produzem no interior da madeira, que em condições favoráveis (humidade e temperatura elevada), permite que perfurem a madeira durante longos períodos de tempo devido à sua actividade (ver Figura 5.35). As galerias têm secção circular, com 4 a 7 mm de diâmetro, encontrando-se cheias de excrementos fecais e serrim [5.01].



Figura 5.35 - Galerias e danos provocados por formigas carpinteiras [5.36 ; 5.37].

Como forma de se identificar a presença de formigas carpinteiras, pode-se verificar a existência de serrim no interior das galerias, bem como de fragmentos de insectos resultantes da sua alimentação, acumulados no exterior destas [5.06].

#### 5.3.4.4 Abelhas Carpinteiras

As abelhas carpinteiras assemelham-se a grandes abelhões, tendo entre 20 a 25 cm de comprimento, possuindo algumas diferenças, coloração negra, ausência de pêlos na região do abdómen tornando a sua superfície brilhante, e asas de tom violáceo [5.01] (ver Figura 5.36).



Figura 5.36 - Abelha carpinteira adulta [5.38].

As madeiras preferencialmente atacadas não se encontram directamente expostas ao sol, não possuem qualquer tratamento nem revestimentos superficiais, e podem encontrar-se degradadas por fungos de podridão [5.06].

As abelhas carpinteiras não se alimentam de madeira, estas penetram nas peças com o intuito de construir celas para depositarem os seus ovos no interior das galerias produzidas [5.14]. No interior das celas depositam pólen para alimentar a futura larva [5.01]. A degradação da madeira acontece com as galerias produzidas no interior das peças de madeira, que para além de terem entre 10 a 15 mm de diâmetro e de poderem ter ramificações, podem atingir 45 cm de comprimento [5.01] (*ver Fotografia 116*). É conveniente referir-se que as galerias não contêm serrim. Os grandes orifícios de entrada com um diâmetro de 10 a 15 mm, assinalam a presença deste insecto (*ver Figura 5.37*).



Figura 5.37 - Galerias produzidas pela abelha carpinteira [5.39 ; 5.40]

O ataque activo é facilmente comprovado pela presença de insectos vivos, serrim fresco no exterior dos orifícios e, de manchas e excrementos fecais junto aos orifícios de entrada [5.14]. As abelhas carpinteiras têm a particularidade de provocarem grandes ruídos ao mastigar a madeira, sendo superiores aos provocados pelo caruncho grande.

#### 5.3.4.5 Xilófagos Marinhos

Os xilófagos marinhos são os principais agressores dos elementos de madeira em ambientes marinhos nomeadamente em pontões, em embarcações, em estacas de fundação, etc. Esta problemática desenvolve-se praticamente em todo o mundo, dependendo da rapidez e da severidade do ataque, do género de xilófagos marinhos (moluscos ou crustáceos) e, das condições de cada local, como a concentração de oxigénio, a temperatura e a salinidade da água [5.01 ; 5.06]. Mesmo em águas de baixa temperatura, a acção dos xilófagos marinhos pode ocorrer mas de uma forma mais lenta. Os xilófagos marinhos podem pertencer a dois géneros diferentes, moluscos ou crustáceos.

##### a) Moluscos

Dos xilófagos marinhos do género dos moluscos, o teredo é o mais comum, e o que provoca os efeitos mais devastadores nas peças de madeira em ambientes marinhos. O teredo é um molusco hermafrodita, de corpo cilíndrico, assemelha-se a uma lagarta, possuindo uma cabeça mais grossa do que o resto do corpo, sendo constituída por duas conchas (ver Figura 5.38). Possui uma coloração esbranquiçada, e pode atingir cerca de 30 cm de comprimento.



Figura 5.38 - Aspecto da forma adulta do teredo [5.41].

O teredo penetra para o interior da madeira através de orifícios de secção circular, com 0,5 a 1 mm de diâmetro [5.01], permanecendo no seu interior toda a sua vida, sem nunca a ter de abandonar. Estes moluscos têm um crescimento muito rápido, e necessitam da temperatura da água acima dos 0 °C, até um máximo de 30 °C [5.42]. É característico encontrarem-se quase exclusivamente em águas transparentes.



A sua alimentação consiste em matéria orgânica existente na água, utilizando a madeira apenas como abrigo. A acção destrutiva é provocada pela penetração em profundidade à medida que vai crescendo, tornando a madeira com um aspecto semelhante a favos de mel (ver Figura 5.39). As galerias atingem portanto o tamanho que o molusco possuir. Na maioria dos ataques apenas são visíveis à superfície algumas perfurações, apesar de o interior da madeira poder estar totalmente destruído, atingindo a rotura de um momento para o outro [5.06].



Figura 5.39 - Aspecto da forma adulta do teredo [5.43 ; 5.01]

#### b) Crustáceos

Os crustáceos são xilófagos marinhos que atacam qualquer tipo de madeira em contacto com a água do mar. A limnoria é a mais comum dos crustáceos, também pode ser designada por pulgas do mar, possui um comprimento de 3 a 5 mm, e uma coloração amarela acastanhada (ver Figura 5.40) [5.42].



Figura 5.40 - Aspecto de uma limnoria adulta [5.01].

Os ataques da limnoria ocorrem em grupo, penetrando no interior da madeira através de orifícios com aproximadamente 2 mm de diâmetro, e com cerca de 1 mm de profundidade, deixando a madeira totalmente cravejada devido à grande quantidade de indivíduos (ver Figura 5.41). A acção do ataque é bem notória pelo exterior.



Figura 5.41 - Peça de madeira apresentando uma enorme quantidade de orifícios de limnoria [5.44].

Os vários orifícios criados pela limnoria encontram-se separados por paredes muito finas, que são totalmente destruídas pelo impacto da água. Este fenómeno amplifica a acção do crustáceo, criando uma nova superfície de ataque à medida que avança em profundidade, produzindo uma perda gradual de secção. Na Figura 5.42 pode observar-se a degradação provocada pela limnoria numa peça de madeira.



Figura 5.42 - Peça de madeira degradada pela acção da limnoria [5.45].

A actividade destes crustáceos sofre influência directa da temperatura e da salinidade da água e, da concentração de oxigénio. O ataque destes xilófagos ocorre durante o ano inteiro, com velocidades de acção inferiores à do teredo. A limnoria tanto está presente em águas turvas como em águas transparentes.

#### **5.4 Patologias de Origem Estrutural**

Este tema é muito importante no que diz respeito ao comportamento das estruturas de madeira, dada a variabilidade natural do material. As patologias de origem estrutural estão associados às patologias ligadas com os outros agentes, e a maior parte das patologias que se pensam que têm origem estrutural pura, tiveram uma origem abiótica ou biótica.

Em comparação com patologias de outras origens, as patologias estruturais em determinadas situações, podem ser mais simples de serem identificadas, sendo de fácil observação as deformações a meio vão que as vigas dos pavimentos adquirem, rotura das ligações por falta de resistência à tracção e, rotura por excesso de carga atingindo a máxima capacidade de carga, entre outras.

As possíveis causas que podem originar danos estruturais nos elementos de madeira, podem ser de vários tipos [5.02]:

- danos relacionados com dimensionamentos estrutural deficiente, como por exemplo
- afastamentos excessivos, secções reduzidas;
- danos causados por erros na concepção da estrutura ao nível da protecção contra as intempéries, excessiva exposição dos elementos de madeira a situações de risco;
- danos relacionados com elementos estruturais inadequados causados por alterações tardias ao projecto original envolvendo a remoção de elementos ou partes de elementos. Tais alterações podem ser intencionais ou podem decorrer de acidentes, como o impacto de veículos, por exemplo;
- danos provocados por elementos estruturais inadequados devido a alterações das cargas e sobrecargas à estrutura original (antigamente era frequente o crescente aumento do número de pisos);
- ausência de ventilação das peças nos apoios, originado a sua deterioração e conduzindo a deslocamentos verticais e rotações acompanhados de redistribuição de esforços na estrutura dos pavimentos;
- elevada fluência dos elementos de madeira, levando a deformações excessivas dos pavimentos ou coberturas;
- deterioração da ligação entre as linhas e as pernas de asnas de madeira, provocando impulsos horizontais nas paredes;
- corte de elementos estruturais, tendo como objectivo, por exemplo, a implantação de redes de águas residuais, podendo conduzir ao colapso de um piso;
- deterioração de ligações (aparafusadas ou pregadas) entre peças constituintes, aumentando a deformabilidade da estrutura .



É importante que se tente identificar com o maior cuidado possível a origem dos danos apresentados nos elementos de madeira, tendo-se presente o conceito de que é sempre possível estarem a actuar vários factores, podendo ser difícil a dissociação dos mesmos. Assim, a execução de uma inspecção cuidada e completa, com recurso às técnicas e equipamentos que se considerem adequadas, deve ser mais exhaustiva e detalhada possível, de forma a permitir uma avaliação estrutural o mais fiável possível.

Nas Figuras 5.43, 5.44, 5.45 e 5.46, apresentam-se diversos danos de carácter estrutural, tais como, fendilhação, deformação, redução da secção, e resistência à tracção insuficiente.



Figura 5.43 - Fendilhação provocada pelo aumento das cargas na estrutura de madeira (Portaria do Mosteiro de Pombeiro, Felgueiras).



Figura 5.44 - Flechas provocadas pelo assentamento da viga principal (Portaria do Mosteiro de Pombeiro, Felgueiras).



Figura 5.45 - Redução de secção num apoio de um pilar (Portaria do Mosteiro de Pombeiro).



Figura 5.46 - Possível fendilhação devido a insuficiente resistência à tracção (Picadeiro D' El Rei, Almeida).

## 5.5 Bibliografia - Capítulo 5

- [5.01] SÁNCHEZ, FERNANDO ; 2001 - *Proteccion preventiva de la madera*. AITIM, Madrid.
- [5.02] WEAVER, MARTIN ; 1997 - *Conserving buildings - A manual of techniques and materials*. Preservation Press, Estados Unidos da América.
- [5.03] CORMA, CORPORACION CHILENA DE LA MADERA - *Manual - La construcción de viviendas en madera*. Chile.
- [5.04] ARRIAGA, FRANCISCO ; BOBADILLA, IGNACIO ; ESTEBAN, MIGUEL ; GARCIA, FRANCISCO ; PERAZA, FERNANDO ; 2002 - *Intervención en estructuras de madera*. AITIM, Madrid.
- [5.05] RIDOUT, BRIAN ; 2000 - *Timber decay in buildings - The conservation approach to treatment*. English Heritage ; Historic Scotland, London.
- [5.06] UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA) ; 1999 - *Wood handbook - wood as an engineering material*. Forest Products Laboratory, Wisconsin.
- [5.07] ALVAREZ, RAMÓN ; CALLEJA, JUAN ; MARTITEGUI, FRANCISCO ; 2000 - *Estructuras de madera - Diseño y cálculo*. 2ª ed. AITIM, Madrid.
- [5.08] CANEVA, GIULIA ; NUGARI, MARIA ; SALVADORI, ORNELLA ; 2008 - *Plant biology for cultural heritage - Biodeterioration and conservation*. The Getty Conservation Institute, Los Angeles.
- [5.09] The Japan Research Society ; 2009.
- [5.10] FEIO, ARTUR ; 2007 - *Estruturas de madeira*. Apointamentos de Patologia das Construções, Mestrado em Engenharia Civil. Universidade do Minho.
- [5.11] [www.mykoweb.com/CAF/photos/Stereum\\_hirsutum\(mgw-04\).jpg](http://www.mykoweb.com/CAF/photos/Stereum_hirsutum(mgw-04).jpg)
- [5.12] [www.botit.botany.wisc.edu/toms\\_fungi/images/phanchrys.jpg](http://www.botit.botany.wisc.edu/toms_fungi/images/phanchrys.jpg)
- [5.13] [www.fungal.genome.duke.edu/images/phanerochaete\\_001.jpg](http://www.fungal.genome.duke.edu/images/phanerochaete_001.jpg)
- [5.14] [www.pariseksaniert.de/holzschutz/holzschaedlinge/pflanzlich/bilder/thums/haunfaeule\\_5"2".jpg](http://www.pariseksaniert.de/holzschutz/holzschaedlinge/pflanzlich/bilder/thums/haunfaeule_5)
- [5.15] [www.pariseksaniert.de/holzschutz/holzschaedlinge/pflanzlich/bilder/braunfaeule\\_klein\\_1.jpg](http://www.pariseksaniert.de/holzschutz/holzschaedlinge/pflanzlich/bilder/braunfaeule_klein_1.jpg)
- [5.16] [www.iscapreservation.co.uk/images/poria-placenta.jpg](http://www.iscapreservation.co.uk/images/poria-placenta.jpg)
- [5.17] [www.preservationtreatments.co.uk/wetrot.jpg](http://www.preservationtreatments.co.uk/wetrot.jpg)
- [5.18] [www.moldbacterialabs.com/images/ceiling-wood-destroying-](http://www.moldbacterialabs.com/images/ceiling-wood-destroying-)

- [5.19] [www.dkimages.com/discover/previews/1013/50247103.JPG&imgrefurl=http://www.dkimages.com/discover/DKIMAGES/Discover/Home/Animals/Invertebrates/Arthropods/Insects/Beetles/Families/Woodworm/Deathwatch-Beetle/Adult/Adult-1.html](http://www.dkimages.com/discover/previews/1013/50247103.JPG&imgrefurl=http://www.dkimages.com/discover/DKIMAGES/Discover/Home/Animals/Invertebrates/Arthropods/Insects/Beetles/Families/Woodworm/Deathwatch-Beetle/Adult/Adult-1.html)
- [5.20] [www.artedelmobileantico.com/j/images/stories/tarli/anobium\\_punctatum.jpg](http://www.artedelmobileantico.com/j/images/stories/tarli/anobium_punctatum.jpg)
- [5.21] [www.forestry.ubc.ca/fetch21/frst308/lab8/anobium\\_punctatum/anobium%20woodwm%20damage%20in%20wood.jpg](http://www.forestry.ubc.ca/fetch21/frst308/lab8/anobium_punctatum/anobium%20woodwm%20damage%20in%20wood.jpg)
- [5.22] CACHIM, PAULO B. ; 2007 - *Construções em madeira - A madeira como material de construção*. Publindústria, Porto.
- [5.23] [www.maison-salamandre.com/images/stories/capricorne\\_des\\_maisons\\_png](http://www.maison-salamandre.com/images/stories/capricorne_des_maisons_png)
- [5.24] [www.sawpa.org.za/images/timber%2026.gif](http://www.sawpa.org.za/images/timber%2026.gif)
- [5.25] [www.agspsrv34.agric.wa.gov.au/ento/pestweb/images/powderpost1ag.jpg](http://www.agspsrv34.agric.wa.gov.au/ento/pestweb/images/powderpost1ag.jpg)
- [5.26] [www. img02.picoodle.com/img/img02/8/5/8/f\\_Reticuliterm\\_cb93013.jpg](http://www.img02.picoodle.com/img/img02/8/5/8/f_Reticuliterm_cb93013.jpg)
- [5.27] [www.galerie-insecte.org/galerie/image/dos1/big/t1.jpg](http://www.galerie-insecte.org/galerie/image/dos1/big/t1.jpg)
- [5.28] NOBRE, TÂNIA ; NUNES, LINA ; 2001 - *Preliminary assesement of the termite distribution in portugal*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).
- [5.29] [www.farm4.static.flickr.com/3184/2723493524\\_cfcca6fbe0.jpg?v=0](http://www.farm4.static.flickr.com/3184/2723493524_cfcca6fbe0.jpg?v=0)
- [5.30] [www.mpaew.de/pixel/biologie-14.jpg](http://www.mpaew.de/pixel/biologie-14.jpg)
- [5.31] [www.bugguide.net/images/raw/](http://www.bugguide.net/images/raw/)
- [5.32] [www.rentokyl.pt](http://www.rentokyl.pt)
- [5.33] [www.pragalgarve.com/termitas.php](http://www.pragalgarve.com/termitas.php)
- [5.34] BORGES, CRISTINA ; BORGES, PAULO ; FERREIRA, MARIA ; GUERREIRO, ORLANDO; MYLES, TIMOTHY ; RODRIGUES, CRISTINA ; 2006 - *Filogenia, biogeografia e ecologia das térmitas dos açores*. Workshop "Medidas para a gestão e combate das térmitas nos Açores", Angra do Heroísmo, Ponta Delgada e Horta.
- [5.35] RODRIGUES, ROMANA ; 2004 - *Construções antigas de madeira - Experiência de obra e reforço estrutural*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, Guimarães.
- [5.36] [www.entm.purdue.edu/entomology/urban/new\\_urban/images/catina\\_pics/carpenter\\_ant.JPG](http://www.entm.purdue.edu/entomology/urban/new_urban/images/catina_pics/carpenter_ant.JPG)
- [5.37] [www.infestation.ca/modules/AxialRealisation/img\\_repository/files/documents/fourmi s%20charpentiere%20dommage.jpg](http://www.infestation.ca/modules/AxialRealisation/img_repository/files/documents/fourmis%20charpentiere%20dommage.jpg)

- [5.38] [www.naturescrusaders.files.wordpress.com/2009/01/carpenter-bee-resting-on-my-hand.jpg](http://www.naturescrusaders.files.wordpress.com/2009/01/carpenter-bee-resting-on-my-hand.jpg)
- [5.39] [www.urbanentomology.tamu.edu/images/wdi/carpenterbee\\_galleries.jpg](http://www.urbanentomology.tamu.edu/images/wdi/carpenterbee_galleries.jpg)
- [5.40] [www.acewalco.com/images/carpenter\\_bee-lg.jpg](http://www.acewalco.com/images/carpenter_bee-lg.jpg)
- [5.41] [www.ifaoe.de/grafik/Bilder/tered.jpg](http://www.ifaoe.de/grafik/Bilder/tered.jpg)
- [5.42] GETE, ANDRES ; 1989 - *Agentes bióticos que atacan a la madera - Ciclo biológico, tipo de ataque y control del mismo*. ALTIM, Madrid.
- [5.43] [www.warrenphotographic.co.uk/photography/cats/01917.jpg](http://www.warrenphotographic.co.uk/photography/cats/01917.jpg)
- [5.44] [www.forestry.ubc.ca/fetch21/FRST308/lab8/limnoria\\_lignorum/Gribble%20damageB1\\_1.JPG](http://www.forestry.ubc.ca/fetch21/FRST308/lab8/limnoria_lignorum/Gribble%20damageB1_1.JPG)
- [5.45] [www.unterwasser-welt-ostsee.de/assets/images/ABohrassel\\_XL\\_k.jpg](http://www.unterwasser-welt-ostsee.de/assets/images/ABohrassel_XL_k.jpg)



## **6. INSPECÇÃO E DIAGNÓSTICO EM ESTRUTURAS DE MADEIRA**

### **6.1 Introdução**

As estruturas e revestimentos de madeira estão quase sempre presentes em todas as construções históricas, e nos edifícios habitacionais nos centros históricos até ao século XX. Ainda hoje é possível visitarmos monumentos e construções que possuem os elementos de madeira originais, levando-nos a constatar a grande durabilidade que a madeira apresenta e, ao mesmo tempo surge a dúvida habitual acerca da falta de segurança aparente deste tipo de estruturas. A verdade é que a madeira é sempre encarada de uma forma natural, por vezes ingénua, como nas situações em que os elementos se encontram totalmente deformados, e mesmo assim existe uma utilização dos edifícios (zona ribeirinha do Porto, por exemplo), sem que as pessoas tenham consciência da degradação que poderá estar instalada no vigamento de todo o edifício. Existem edifícios com apenas 50 anos, em estrutura de madeira, que se encontram totalmente em perigo de ruir, tal como existem edifícios com mais de 500 anos, que possuem o madeiramento original totalmente intacto. Apesar da grande durabilidade da madeira, esta só é durável se for preservada ao longo da sua vida útil, isto é, há a necessidade de se zelar pelas condições adequadas do espaço em que os elementos de madeira estão inseridos. O primeiro passo para a preservação da madeira ao longo dos anos é a manutenção do bom estado das coberturas e fachadas, garantindo-se a impermeabilização das mesmas, sem descuidar a existência de boa ventilação interior. Se se garantir que o espaço interior não será afectado por futuras infiltrações de água, ou por humidade por condensações, ou que o nível freático não se encontra elevado, e caso a madeira seja durável, à priori esta irá apresentar elevada durabilidade, exceptuando-se apenas a afectação por causas acidentais.

Com a possibilidade das estruturas de madeira se encontrarem deterioradas, caso seja necessário intervir na construção, quer seja por alteração da utilização, quer seja apenas por obras de conservação, torna-se imperativo a necessidade de uma inspecção da construção por parte de algum técnico especializado nesta área. Uma inspecção bem elaborada permite a obtenção de um diagnóstico realista, podendo poupar-se muitos custos desnecessários, como por exemplo, situações em que é demolida toda a estrutura de madeira dos edifícios sem esta ter sido diagnosticada, em que possivelmente a maioria dos elementos podiam estar em bom estado,

penalizando assim o custo da intervenção. No caso de construções antigas, esta situação pode ser relevante, sendo que o valor cultural atribuído à construção está associado à sua antiguidade, quanto mais antiga for maior será o seu valor, justificando-se desta forma que uma inspecção e diagnóstico eficazes são cruciais para a boa preservação do património.

Segundo *Cóias* [6.01], as inspecções e monitorizações nas construções antigas normalmente ocorrem pela verificação de algum dos factores a seguir apresentados:

- inspecções regulamentares ou de rotina;
- existência ou suspeita de danos visíveis na construção;
- ocorrência de danificações;
- alteração da utilização, ou da geometria para condições mais exigentes;
- avaliação pelas autoridades competentes de agravamento de acções quando imposto por nova regulamentação em vigor.

A elaboração de um diagnóstico correcto é fundamental para o cumprimento da resolução do mesmo. O diagnóstico só pode ser confirmado após terem sido executadas todas as medidas para tratamento e preservação, e após terem sido eliminadas as causas patológicas, ou interrompido o seu desenvolvimento, ou a progressão dos efeitos indesejados. Deste modo, as inspecções são a base da acção futura, qualquer erro no diagnóstico pode comprometer a resolução da patologia apresentada.

A inspecção detalhada para ocorrer assenta obrigatoriamente na realização de ensaios, no levantamento geométrico de todas as dimensões, com vista à avaliação das características dos materiais, assim como à caracterização dos danos estruturais mais relevantes. Permite ao técnico interpretar o que mais ninguém vê, isto é, por vezes as pessoas não dão o devido valor às alterações de aspecto que os materiais sofrem, como o significado das manchas de humidade, a procura por excrementos de insectos, esporos e micélio dos fungos, cheiro a terra húmida, cheiro a bolor, existência de bolores, entre outras.

A avaliação do estado de uma construção, pode ser efectuada através de muitas técnicas, a mais comum e obrigatória em todas as situações é a inspecção visual, a qual pode ser complementada



por diversos ensaios, ou com ensaios laboratoriais, utilizados para analisar amostras de materiais ou partes de elementos recolhidos *in situ*.

Os ensaios que podem ser efectuados numa inspecção para auxílio do diagnóstico podem ser destrutivos ou não destrutivos. Os ensaios não destrutivos (NDT) são ensaios que determinam as propriedades do material em estudo sem causar alterações significativas a este. Os ensaios destrutivos (DT), tal como o nome indica, necessitam de destruir uma parte de um ou vários elementos, quer seja para extracção de amostras ou partes de construção. Os ensaios laboratoriais na grande maioria das vezes são utilizados como complemento dos ensaios destrutivos, salvo excepções de recolha de amostras *in situ* sem a destruição dos elementos. Os testes em laboratório permitem determinar os valores da resistência à compressão, à flexão e ao corte, tal como outras características elásticas dos materiais [6.01].

Os ensaios não destrutivos podem causar alguns danos ao material mas estes serão mínimos, como pequenos furos, ou riscos, podendo mesmo ser ocultados. É necessário que para a execução destes ensaios exista um bom acesso à estrutura a inspeccionar, sendo admissível a remoção de soalhos, ou de estuques (por exemplo), para alcançar os elementos em estudo.

Os ensaios não destrutivos, normalmente são utilizados para [6.02]:

- avaliação do desempenho da estrutura total;
- análise individual das propriedades dos materiais, teor em água, porosidade, densidade, entre outras;
- detecção de vazios, fendas e descontinuidades no interior da madeira, que de outra forma não seria possível identificá-los;
- detecção de detalhes e elementos escondidos.

As situações em que devem ser executados os ensaios não destrutivos em detrimento dos destrutivos são [6.01]:

- quando tiver que ser mantida a integridade da construção;
- quando as características do material ou do elemento construtivo, não permitirem uma fácil remoção da amostra;
- quando a grandeza em estudo não pode ser medida a partir da amostra.

Pode acontecer que por vezes os ensaios não destrutivos não consigam reunir informação suficiente para a caracterização do estado de conservação da construção, então, deverá ser analisada a hipótese de se executarem ensaios destrutivos, ponderando-se os custos e os benefícios envolvidos. Esta análise pode-se revelar complexa, principalmente pela impossibilidade de se conseguir estimar o custo da destruição de património. Por outro lado, também é verdade, que a construção poderá sair beneficiada com os ensaios destrutivos. De uma forma geral estes ensaios melhoram a qualidade da informação previamente obtida, isto é, os ensaios destrutivos completam a inspecção fornecendo resultados quantitativos, proporcionando que o diagnóstico seja mais exacto, podendo conduzir a uma intervenção mais reduzida [6.03].

Actualmente existem muitas técnicas e equipamentos de inspecção disponíveis aos técnicos, que vão desde a inspecção visual, até às técnicas modernas como a utilização de radares e termografia. Cada um dos ensaios tem um nível de desenvolvimento próprio e a sua aplicação deve ser adequada à espécie de madeira em análise. Estes proporcionam a obtenção de informação relevante acerca dos elementos da estrutura ensaiados [6.01]:

- avaliam a capacidade do desempenho da construção, isto é, se os seus elementos estarão em condições de serviço ou não;
- determinam as causas que originam a patologia encontrada *in situ*, possibilitando uma intervenção mais adequada;
- ajudam à definição de medidas correctivas menos intrusivas e melhor adaptadas a adoptar;
- permitem a definição e planeamento atempado das intervenções;
- permitem monitorizar o comportamento da construção após as intervenções.

As técnicas de inspecção disponíveis podem ser integradas em 3 categorias distintas [6.04]:

- tradicional, corresponde à inspecção visual que combina a observação com a utilização do martelo e do formão, entre outros;
- tecnologias actuais, como o higrómetro, o resistógrafo, o pilodyn, o boroscópio, os ultra-sons, a fotogrametria, entre outras;
- tecnologias de futuro desenvolvimento, como o radar, a termografia, raios-x, raios gama, ressonância magnética, e análise de sinal melhorado na tecnologia informática.

## **6.2 Ensaios e Equipamentos**

Antes de se iniciar a descrição dos equipamentos e ensaios mais usuais deve ser referido que os métodos de avaliação não destrutivos (NDT) podem ser divididos em dois grupos distintos, métodos globais (GTM - Global Test Method) e métodos locais (LTM - Local Test Method) [6.05].

Os métodos globais avaliam o elemento na sua totalidade, permitindo confirmar o seu estado de conservação ao longo da sua secção, fazem parte deste grupo os ultra-sons e os métodos vibracionais [6.05].

Os métodos locais avaliam o elemento pontualmente, determinando a secção residual resistente dos elementos, analisando variações anormais de densidade associadas a perda de massa resultante da deterioração por insectos xilófagos [6.05]. Pertencem a este grupo o Pilodyn e o Resistógrafo, que são os ensaios mais comuns. Estes ensaios complementam muito bem a inspecção visual, confirmando suspeitas identificadas pela inspecção visual que de outra forma não poderia ser conclusivo.

Existem actualmente muitos outros ensaios para além dos acima referidos, e que podem ser aplicados em madeira maciça e, em derivados da madeira, como por exemplo, termografia, fotogrametria, endoscopia, ondas sónicas, microscopia, infra-vermelhos, cães, raios-x, raios-gama, micro-ondas e ressonância magnética nuclear [6.04 ; 6.05]. O facto de alguns destes ensaios ainda se encontrarem em desenvolvimento, ou de possuírem uma exigência considerável em medidas de segurança devido ao risco para a saúde, ou de apresentarem um custo elevado e um nível de exigência técnica acima do normal, tornam estes ensaios pouco atractivos à rotina de inspecção e diagnóstico de estruturas de madeira. Face ao que é necessário para um diagnóstico, as limitações apresentadas pelos ensaios não compensam a informação que estes podem fornecer, salvo raras excepções em que poderá ser necessário um tipo de ensaios específico para um determinado fim.

### **6.2.1 Ferramentas de Apoio à Inspeção Visual**

As ferramentas de apoio à inspecção visual, visam auxiliar a observação visual para uma melhor identificação e caracterização dos elementos de madeira, e do espaço envolvente (pormenores e sistemas construtivos). A designação da inspecção visual como método tradicional, relaciona-se em

parte com a utilização de ferramentas ditas tradicionais, possuindo uma existência secular ou milenar.

O equipamento de segurança individual, constituído por capacete, luvas, botas e óculos de protecção (ver Figura 6.1) deve ser parte integrante de todas as visitas de inspecção.



Figura 6.1 - Alguns equipamentos de protecção individual.

Por vezes é necessário algum tipo de plataforma para aceder aos locais a inspecionar, podendo ser utilizadas escadas de alumínio, andaimes, ou plataformas elevatórias. Relativamente à iluminação, mesmo quando existe iluminação natural ou artificial suficiente, deve fazer parte dos equipamentos um projector e uma lanterna e, sempre que necessário, os holofotes asseguram um maior poder de iluminação.

A utilização de bússola para identificação da orientação das fachadas pode revelar-se importante, como por exemplo, se considerarmos uma fachada voltada a norte que possua janelas, esta terá uma maior probabilidade de possuir níveis de humidade mais elevados. A medição da temperatura interior e exterior, e da humidade relativa do ar no espaço interior, é importante para as situações em que é necessário definir-se o ponto de equilíbrio hidrostático entre a madeira e o ar interior, essas leituras podem ser obtidas com uma estação meteorológica ou com a utilização de sondas de temperatura.

Para auxiliar no levantamento das dimensões dos elementos são utilizados a fita métrica e o distanciómetro laser.

Os binóculos, a lupa e um espelho extensível ajudam na observação do elemento, quer este se encontre distanciado, ou tenha dimensões reduzidas, ou se encontre em local de difícil acesso.

A limpeza dos elementos em estudo pode ser conseguida com a utilização de escovas e pincéis macios.

É frequente, que em determinados locais seja necessário a remoção de soalho ou de estuque, por exemplo, tendo-se que recorrer a um pé de cabra, ou a uma marreta de demolição.

O martelo e o formão são duas ferramentas extremamente essenciais no apoio da observação visual, as pancadas do martelo na peça de madeira indicam se esta se encontra degradada quando se ouve um som oco, enquanto que um som forte com eco, confirma um bom estado de conservação. O formão, ou o palhete utilizam-se para raspar a superfície da madeira, ou para penetrar o elemento com o intuito de se definir a profundidade de degradação. Se a madeira ao ser raspada pelo formão, ou pelo palhete, soltar uma lasca longa e plana, indica que a madeira se encontra sã, por outro lado, quando a madeira solta uma lasca curta e enrolada indica que a madeira se encontra alterada pela acção de fungos (ver Figura 6.2) [6.06].

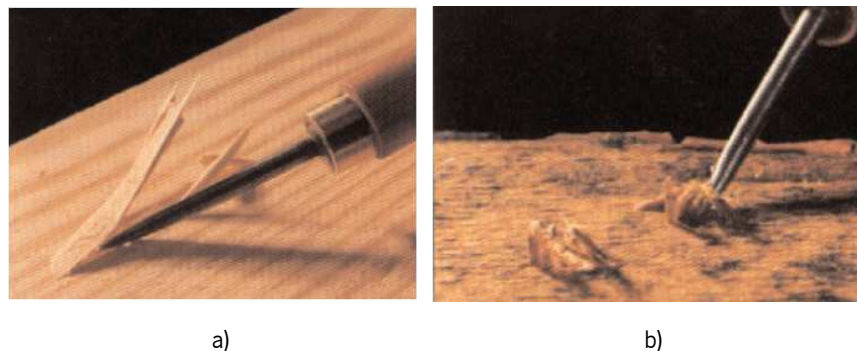


Figura 6.2 - Penetração do palhete: a) lascas de madeira sã; b) lascas de madeira deteriorada por fungos [6.06].

Para identificação da espécie de madeira, quando existem dúvidas, pode-se retirar um pouco de madeira com o auxílio de uma lâmina ou de um canivete, para servir de comparação, ou para ser analisada em laboratório. Sugere-se que nestes casos o técnico possua saquetas de plástico para guardar convenientemente a amostra.

Em algumas situações é necessário a utilização de berbequim eléctrico, este permite efectuar furos

na madeira avaliando-se pela dificuldade de penetração da broca na madeira o estado de conservação da madeira. A situação mais usual é no encontro das vigas nas paredes, em que o berbequim permite perfurar desde a parte acessível (parte superior, por exemplo), até ao topo da peça que se encontra na parede [6.07]. Os furos executados pela broca deverão ter um diâmetro entre 3 a 6 mm, para serem considerados insignificantes. A profundidade de extensão de um ataque biológico pode ser determinada, sem a eliminação de toda a parte destruída. Por vezes, guarda-se o serrim resultante da furação para uma posterior análise laboratorial de identificação da espécie de madeira.

No caso de existirem fissuras nos elementos, a largura destas pode ser medida com a utilização do medidor de fendas, proporcionando desta forma uma medição mais fiável.

Por último, a máquina fotográfica, um bloco de notas e um marcador, são necessários para se efectuar o registo da inspecção visual e, a marcação de alguns elementos que possam ser necessários.

Tentou-se aqui apresentar um conjunto de ferramentas (ver Figura 6.3) o mais completo possível para acompanhamento numa inspecção visual, sendo claro que existem muitas mais e que a selecção das ferramentas a utilizar depende também da realidade do local e dos elementos a inspecionar.



Figura 6.3 - Algumas das ferramentas que acompanham a inspecção visual.

### 6.2.2 Higrómetro

O higrómetro consiste num aparelho electrónico portátil, que mede o teor em água em elementos de madeira maciça ou em produtos derivados da madeira. É constituído por uma caixa onde se encontra o écran e os botões de controlo dos parâmetros (temperatura e espécie de madeira) e, por dois eléctrodos acoplados numa peça de plástico (situações de madeira mais branda) ou de metal (situações de madeira mais dura) para cravar na madeira (higrómetro de profundidade ou de agulhas) ou para encostar (higrómetro de superfície ou de contacto) (ver Figura 6.4).

O comprimento das pontas de eléctrodo é relevante, devendo ser adequado à altura da peça a aplicar, evitando-se assim a interferência de velaturas ou revestimentos superficiais existentes. Segundo *Feio* [6.05], as leituras do higrómetro são influenciadas pela presença de sais provenientes de produtos preservadores aquosos, retardadores de fogo e contaminação pela água do mar, aumentando a condutibilidade eléctrica da madeira.

A leitura do teor em água da madeira só é possível após seleccionar-se no aparelho a temperatura do ar interior onde se encontra a madeira em estudo, e a espécie de madeira em causa, no caso do higrómetro apresentado na Figura 6.4, existem 4 classes, e cada uma delas corresponde a várias espécies de madeira.



Figura 6.4 - Higrómetro de contacto com eléctrodo de percussão e pontas de eléctrodo de 60 mm.

O funcionamento do higrómetro baseia-se no princípio de que a resistência eléctrica ou a capacitância de determinado meio variam com a quantidade de água presente no elemento, quanto maior for o teor em água maior é a condutibilidade eléctrica da madeira [6.04].

Sempre que não forem seguidas as instruções dos fabricantes dos aparelhos, *Feio* [6.05] recomenda que a aplicação do equipamento seja efectuada a mais de 0,5 m de distância do topo do elemento, impondo-se uma penetração das agulhas até aproximadamente 1/4 a 1/5 da espessura da peça.

### 6.2.3 Métodos Globais (GTM)

#### 6.2.3.1 Ultra-Sons

O método ultra-sónico consiste na emissão de ondas sonoras de alta frequência, acima da gama audível, em que para a madeira variam entre 20 a 500 kHz [6.05 ; 6.08].

Os ultra-sons podem ser utilizados para avaliar a secção resistente resultante de ataques biológicos de uma peça de madeira, relacionando a velocidade de transmissão transversal com a resistência do elemento [6.07 ; 6.05]. São adequados para determinar defeitos locais, permitindo uma boa avaliação das propriedades locais dos elementos *in situ*.

Este ensaio pode também ser relacionado com as propriedades elásticas da madeira, permitindo determinar o módulo de elasticidade dinâmico ( $E_{din}$ ) através da relação da velocidade de propagação das ondas e da densidade do material (6.1) [6.07], em elementos prismáticos, homogêneos e isotrópicos, com uma largura de secção menor do que o comprimento de onda [6.05]:

$$E_{din} = v^2 \cdot \rho \quad (6.1)$$

em que,

$E_{din}$  : corresponde ao módulo de elasticidade dinâmico (kg / m<sup>2</sup>.s)

$v$  : corresponde à velocidade de propagação da onda ultra-sónica (m / s)

$\rho$  : corresponde à densidade do elemento (kg / m<sup>3</sup>)

A resistência da peça de madeira pode ser estimada deduzindo-se o módulo de elasticidade estático ( $E_{sta}$ ) partir do dinâmico, pela seguinte expressão [6.05]:

$$E_{sta} = 0,9 \cdot E_{din} \quad (6.2)$$

em que,

$E_{sta}$  : corresponde ao módulo de elasticidade estático (kg / m<sup>2</sup>.s)



Existem 3 métodos diferentes de aplicação de ultra-sons, o método dos ecos, o método da transmissão e, o método da ressonância [6.07]. O método dos ecos não tem aplicação em materiais heterogéneos, como é o caso da madeira e, o método da ressonância apenas pode ser aplicado em laboratório.

O método da transmissão é o método apropriado para a madeira e, consiste na aplicação de 2 transdutores piezoeléctricos, um emissor e um receptor (ver Figura 6.5). O contacto entre os transdutores e o material é extremamente importante, como o ar dificulta a transmissão das ondas sonoras, é necessário a aplicação de um gel para aumentar a adesão entre o material e os transdutores.

A pressão sonora é máxima na direcção axial do transdutor, e diminui para as direcções oblíquas à medida que aumenta o ângulo [6.07]. As ondas acústicas ao encontrarem algum tipo de obstáculo (nó ou fissura), contornam-no, aumentando o tempo decorrido até chegar ao receptor. O percurso percorrido é maior ao contornar as irregularidades do material, como se pode verificar na Figura 6.5.

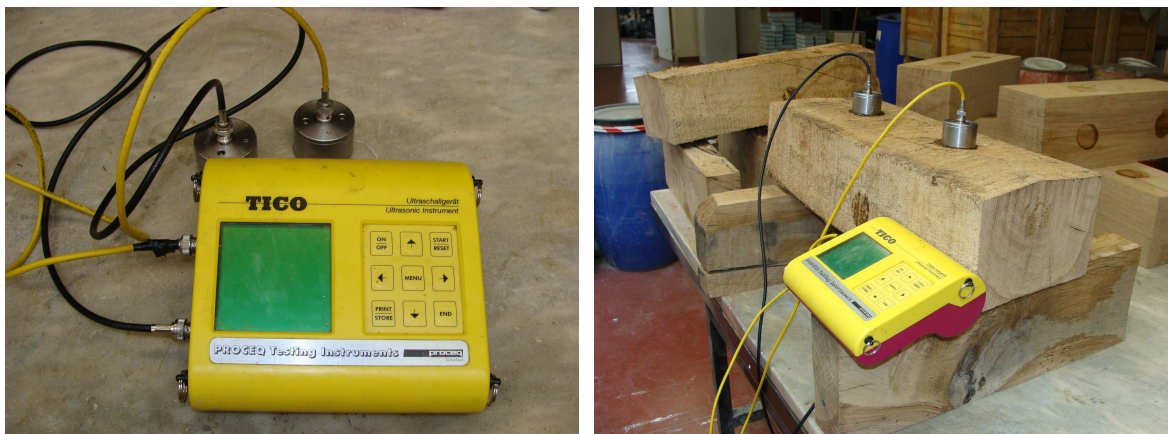


Figura 6.5 - Equipamento de ultra-sons.

A velocidade de propagação das ondas sonoras é influenciada por diversos factores:

- teor de humidade; para cada aumento de 1 % de humidade ocorre uma diminuição da velocidade de aproximadamente 0,8 % [6.07];
- temperatura; o aumento da temperatura reduz a velocidade, sendo mais significativo quanto maior for o teor em água [6.07];
- pressão aplicada nos transdutores, esta faz variar a velocidade de propagação;

- zonas deterioradas ou descontínuas, estas reduzem a velocidade [6.05];
- direcção em relação às fibras da madeira; na direcção radial a velocidade é aproximadamente 1/3 da velocidade na direcção paralela às fibras [6.08].

Na Figura 6.6 pode-se observar a aplicação do método de ultra-sons, visualizando-se as trajectórias possíveis seguidas pelas ondas ultra-sónicas para contornar os obstáculos.

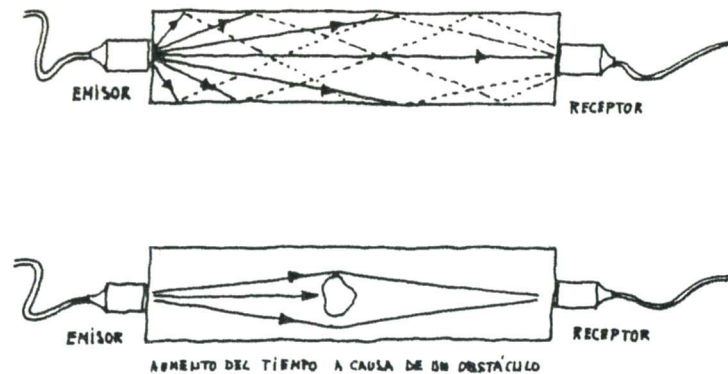


Figura 6.6 - Aplicação do método de transmissão de ultra-sons. Pode observar-se o aumento do percurso devido a obstáculos no interior da madeira [6.07].

A aplicação prática do método de transmissão dos ultra-sons pode fazer-se segundo três tipos diferentes, o método directo, o método indirecto e método semi-directo. Na Figura 6.7 pode-se observar de forma esquemática a disposição dos transdutores segundo os três métodos diferentes. O método directo é o mais apropriado para a determinação do módulo de elasticidade do elemento e consiste em colocarem-se os transdutores alinhados em faces opostas da peça. O método indirecto consiste na colocação dos transdutores na mesma face dispostos paralelamente um em relação ao outro. E por último, o método indirecto, consiste em dispor os transdutores em faces perpendiculares. Na Figura 6.7 ilustra-se a aplicação dos vários métodos numa peça de madeira.

Na maioria das estruturas de madeira, as vigas encontram-se apoiadas em paredes de alvenaria, não se possuindo desta forma as extremidades livres para aplicação do método directo, nestes casos pode-se colocar um transdutor cónico (não necessita de gel para o contacto) na face inferior junto a uma das extremidades, inclinado 45 ° em relação à face da viga e, na outra extremidade coloca-se o transdutor junto ao apoio, na face superior, inclinado 45 ° em relação ao topo superior [6.07].

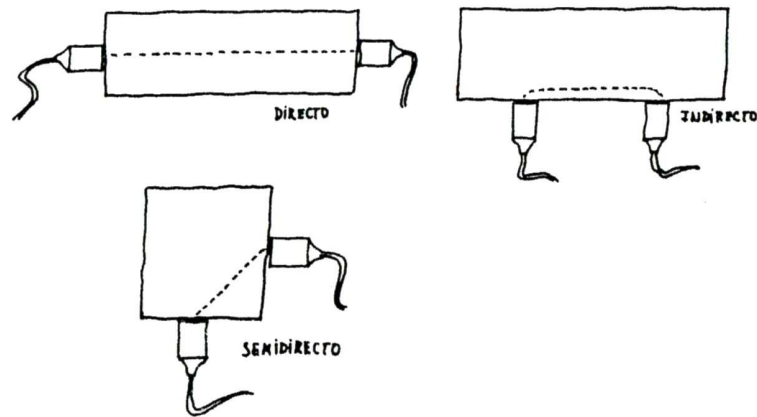


Figura 6.7 - Diferentes tipos de métodos de aplicação dos ultra-sons: o directo, indirecto e semi-directo [6.07].

De um ponto de vista prático, o método ultra-sónico nem sempre tem uma fácil utilização, principalmente quando é necessária a sua aplicação em locais de acesso condicionado, como por exemplo no caso prático que será apresentado no Capítulo 7. Este método necessita de ser executado por duas pessoas, em que uma delas deverá fixar os transdutores ao elemento em estudo e, a outra deverá operar os controlos do aparelho. É importante que a pressão aplicada nos transdutores seja sempre idêntica, caso contrário poderá originar dispersões na velocidade de propagação das ondas acústicas. Este requisito nem sempre é fácil de se conseguir, dependendo do local e da forma como se está a efectuar o ensaio. Se o operador se encontrar numa posição incómoda, provavelmente os resultados serão afectados pela dificuldade do ensaio, por exemplo, a aplicação do método ultra-sónico numa viga de madeira colocada em cima de uma mesa de trabalho sofrerá, à partida, menor interferência de factores exteriores relacionados erro humano, como diferente pressão aplicada, do que num ensaio em que o acesso à viga seja feito por o piso inferior em cima de uma escada (ver Capítulo 7).

Uma preocupação fundamental na aplicação dos transdutores é o contacto entre estes e a superfície da madeira, é necessário que estejam bem encostados, sem que ocorra a interferência do ar na propagação das ondas. Deve-se colocar gel para o contacto na superfície de madeira, e nos transdutores. Por vezes a própria superfície não se apresenta suficientemente plana para garantir um bom contacto, nessas situações, caso não exista qualquer dano significativo na aparência do elemento, ou na sua integridade estrutural, pode-se tentar alisar a superfície com recurso ao formão.

O método ultra-sónico quando utilizado em conjunto com a inspeção visual, adquire uma maior precisão nos resultados. Apesar de ser um método simples relativamente à utilização e transporte, e de rápida execução, este apresenta algumas limitações:

- dificuldade de utilização em zonas de inspeção em que a estrutura seja de acesso difícil;
- requer uma bom acoplamento do transdutor à superfície a inspeccionar;
- requer um operador experiente que aplique sempre a mesma força de pressão;
- grande dispersão de resultados em aplicações *in situ*.

#### **6.2.4 Métodos Locais (LTM)**

##### **6.2.4.1 Pilodyn**

O Pilodyn consiste num equipamento para ensaio de elementos de madeira originalmente desenvolvido na Suíça, para avaliar a degradação superficial em postes de apoio a telecomunicações [6.09].

O funcionamento do Pilodyn caracteriza-se pela penetração na superfície da madeira de um pino de aço, de 2,5 mm de diâmetro (Pilodyn 6J), disparado por uma mola com uma determinada rigidez, conforme se pode observar na Figura 6.8. A profundidade de penetração na madeira é lida no aparelho, numa escala de 0 a 40 mm (para o Pilodyn 6J). Este instrumento permite avaliar a degradação superficial da madeira, relacionando a penetração do pino metálico com a redução da resistência superficial à penetração.

A penetração do pino do Pilodyn pode ser relacionada com o teor em água da madeira, quanto maior for o teor em água maior será a profundidade da penetração. Este fenómeno pode ser explicado com recurso à estrutura celular da madeira, a presença de água na estrutura celular conduz a um ligeiro enfraquecimento do material, podendo ser comprovado através da análise comparativa com espécimes secos [6.04].

Existem vários modelos de Pilodyn, diferindo no potencial elástico da mola, por exemplo os modelos 12J e 18J possuem molas de rigidez bastante elevada, e o modelo 4JR permite um disparo repetido do pino [6.09].



Figura 6.8 - Ensaio com o Pilodyn: a) ensaio de um provete com o Pilodyn 6J; b) Pormenor do Pilodyn 6J.

A utilização prática deste equipamento permitiu a expansão da sua aplicação, tendo-se concluído que a sua utilização periódica consegue detectar o aparecimento de doenças nas árvores, para além disso, ajuda à definição de parâmetros de qualidade relativamente à densidade da madeira, e auxilia na integração de diversos tipos de madeira segundo classes e categorias [6.09].

A densidade da madeira pode ser estimada através deste ensaio, pela relação entre esta e a diferente energia absorvida pelo elemento inspeccionado [6.09]. A degradação da madeira é avaliada directamente pela leitura da profundidade de penetração do pino. Uma peça de madeira que se encontre degradada terá uma maior penetração com o Pilodyn do que a mesma peça em madeira sã.

Relativamente a observações de índole prática, o pilodyn é fácil de se utilizar, basta que se tenha o cuidado de se colocar o equipamento sempre perpendicularmente à superfície da madeira a analisar, e que os dois pernos de metal que possui à frente encostem devidamente na superfície. Em madeiras duras poderá haver alguma dificuldade na extracção do equipamento da superfície da madeira, o que não apresenta qualquer problema face à resistência do material que constitui o Pilodyn.

O método de ensaio com o Pilodyn é simples de ser utilizado, fácil de transportar, é de fácil leitura e, actualmente serve de apoio à indústria da madeira ajudando na classificação de troncos segundo classes perante diferentes densidades estimadas pelo Pilodyn [6.05]. As suas limitações consistem

em apenas determinar a dureza ou a resistência superficial à penetração e, provocar um furo residual na madeira com 2,5 mm.

#### 6.2.4.2 Resistógrafo

O resistógrafo é um equipamento que se assemelha a um berbequim, em que uma broca/agulha de alimentação eléctrica perfura toda a largura de secção da peça de madeira em análise. Permite uma análise ao estado da madeira em profundidade, determinando a resistência que a madeira oferece ao avanço e rotação contínuos da agulha, obtendo-se um gráfico em papel (perfil resistográfico), ou em suporte informático caso se faça uma ligação do equipamento a um computador.

O resistógrafo é constituído por um tubo telescópico que contém uma broca/agulha flexível em tungsténio, dentro do tubo possui dois motores eléctricos, um acciona o avanço da agulha a velocidade constante, o outro garante a rotação constante da agulha (ver Figura 6.9). Por sua vez, o tubo telescópico encontra-se ligado a uma caixa de armazenamento de dados donde sai o registo gráfico do ensaio em papel, existe também a possibilidade da ligação a um computador para transferência dos gráficos. A broca tem aproximadamente 3 mm de diâmetro na ponta e, 1,5 mm na parte restante. O comprimento da agulha depende do tipo de resistógrafo bem como do fabricante, podendo atingir um máximo de 1500 mm. A forma da ponta da agulha permite reduzir o efeito do atrito na perfuração, não interferindo assim no esforço dos motores do aparelho.

A resistência oferecida pela madeira à penetração da agulha relaciona-se com a sua densidade, sendo medida segundo o consumo de potência exigido ao motor durante a perfuração ao longo da profundidade de penetração [6.07 ; 6.09]. Com a perfuração da madeira ao longo da secção radial, conseguem-se distinguir as diferenças de densidade entre a madeira de Verão e a madeira de Primavera, identificando-se as perfurações dos diversos anéis de crescimento anual.

O perfil resistográfico que se obtém do ensaio, é de simples interpretação, o eixo das abcissas (xx) corresponde à profundidade de penetração da agulha em mm, e o eixo das ordenadas (yy) corresponde à resistência oferecida pela madeira à perfuração da agulha medida em bits. Na Figura 6.10, podem-se observar dois exemplos de perfis resistográficos dispostos sob a secção ensaiada. Os picos dos perfis correspondem a madeira de densidade mais elevada, e as zonas próximas dos



0 bits correspondem a partes da madeira que se encontram degradadas ou com discontinuidades, tal como se verifica na Figura 10.b no intervalo entre 150 e 250 mm. Comparando-se o perfil com a secção real perfurada que se encontra acima do perfil, verifica-se que a zona identificada no perfil como degradada corresponde efectivamente a uma discontinuidade.

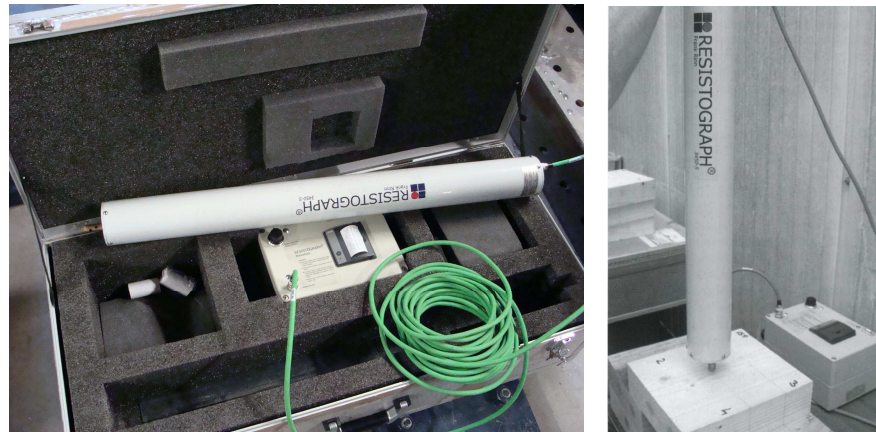


Figura 6.9 - Aspecto do resistógrafo [6.10].

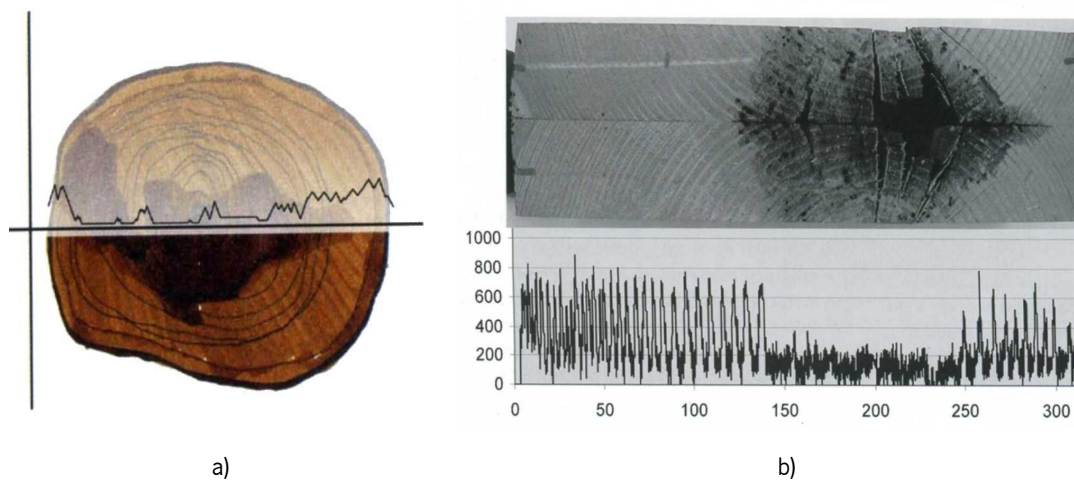


Figura 6.10 - Exemplos de perfis resistográficos em comparação com as secções perfuradas [6.09 ; 6.10].

Outra forma de se analisar o perfil resistográfico consiste em analisar os pontos que atingem valores de bits mais elevados, sendo os bits a medida utilizada para identificar a resistência da madeira à penetração, quanto maiores forem os bits maior é a densidade da madeira. Portanto, consegue-se identificar a que profundidades é que o elemento de madeira possui densidade mais elevada.

Tal como será apresentado no caso prático no Capítulo 7, os perfis resistográficos permitem obter uma área designada por área resistográfica, correspondente a toda a área situada abaixo da curva

do perfil. A área pode ser calculada pelo integral de área do perfil resistográfico total, como se apresenta na seguinte expressão.

$$\int_0^h \text{Perfil resistográfico total} \quad (6.3)$$

em que,

$h$  : profundidade total de penetração da agulha do Resistógrafo (mm).

Quanto maior for a área resistográfica em melhor estado se encontra a madeira, indicando assim maior densidade. Dever-se-á analisar a área resistográfica verificando-se a existência de zonas em mau estado, por muito grande que seja uma área resistográfica, se o perfil contiver zonas deterioradas o benefício da área não confirma o bom estado de conservação da madeira. A resistência da madeira ao avanço da perfuração da agulha pode ser afectada por alguns factores que podem originar a alteração do perfil resistográfico, são eles [6.07]:

- ponta da agulha pouco afiada ou desgastada;
- alteração da direcção do caminho de perfuração, devido a alguma descontinuidade interior;
- ângulo de perfuração contra os anéis anuais.

O ensaio do Resistógrafo deve ser realizado em conjunto com a inspeção visual, e outros métodos não-destrutivos, que permitam uma avaliação qualitativa ou uma avaliação de carácter global.

Apesar de ser um ensaio útil para complementar a inspeção visual, este apresenta algumas limitações:

- necessidade de se manter o aparelho na vertical, ou na horizontal, conforme se encontrar o elemento a inspeccionar;
- furo resultante da aplicação do equipamento com 3 mm de diâmetro;
- peso e volume considerável;
- ensaio demorado em elementos de densidade elevada, bem como em elementos de secção média e elevada;
- pode sofrer desvios no avanço da agulha caso existam descontinuidades no interior da madeira;
- o perfil resistográfico apresenta menor área quanto maior for o teor de humidade [6.10].



As vantagens da utilização do resistógrafo são [6.07 ; 6.09]:

- permitir inspecionar elementos em locais de difícil acesso (entrega das vigas nas paredes)
- em elementos que não é possível determinarem-se as dimensões da secção, é possível conhecer-se a altura da secção através da profundidade de penetração;
- permite analisar o padrão da distribuição dos anéis anuais;
- permite determinar a que profundidade da secção analisada é que existe madeira degradada;
- análise dos resultados facilitada pela resolução gráfica;
- simplicidade do armazenamento de dados;
- fácil manuseamento técnico;

Este ensaio é muito utilizado pelos produtores de madeira, nomeadamente na detecção de danos internos que possam ocorrer nas árvores, fornecendo resultados que possam ajudar a determinar o estado de conservação das mesmas. O ensaio do Resistógrafo pode ser fisicamente exigente, o peso considerável e o tamanho do equipamento, tornam-no pouco atractivo à sua utilização. A aplicação do equipamento em locais de difícil acesso à estrutura em análise, dificulta a qualidade do ensaio. Em locais como o que será relatado no caso de estudo, em que o ensaio foi efectuado pelo piso inferior, acedendo-se às vigas através de uma escada de alumínio, a dificuldade de execução do ensaio é muito grande, não sendo possível a realização de muitos ensaios seguidos. Alerta-se para o facto do resistógrafo exigir uma capacidade física considerável, para além de ter que se suportar o equipamento com os braços, tem que se fazer força para o pressionar contra a superfície da madeira a perfurar e, quando a madeira é dura mais força é necessário aplicar.

Do ponto de vista de funcionamento do aparelho, quando em utilização deve-se confirmar com antecedência se o mesmo terá papel e bateria suficiente para executar todos os pontos de ensaio da inspecção.

### **6.3 Metodologia de Inspeção e Diagnóstico**

A inspecção e diagnóstico de estruturas de madeira é uma das partes do processo de reabilitação e conservação da estrutura. Fornece aos projectistas a informação necessária para o projecto de uma

intervenção adequada, caracterizando o estado de conservação dos elementos da estrutura, e avaliando a secção resistente. Proporciona a identificação de problemas relacionados com pormenores e sistemas construtivos, ou com falhas nas redes de águas, entre outros.

Segundo *Feio* [6.11], a avaliação das propriedades dos elementos de madeira *in situ* exigem o desenvolvimento de duas fases operativas, a fase diagnóstica e, a fase de interpretação dos resultados. A fase diagnóstica consiste em toda a metodologia de inspecção e diagnóstico que será apresentada em seguida, e que identifica a patologia existente nos elementos analisados e a caracterização do seu estado de conservação. A fase de interpretação dos resultados ocorre posteriormente à fase diagnóstica, e tem como propósito caracterizar o comportamento resistente das estruturas, tendo em vista a preparação de informação para verificação e dimensionamento estrutural.

Considera-se que os técnicos devem utilizar os diversos equipamentos de protecção individual ao aplicarem a metodologia abaixo apresentada. Para além dos resíduos de madeira que podem saltar aos olhos do técnico durante os ensaios, a própria utilização das ferramentas e dos equipamentos induz vibrações à estrutura, provocando a queda de todo o tipo de sujidade, ou até mesmo de elementos de madeira deteriorados (fragmentos de soalho, pedaços de vigas transversais, por exemplo).

Apresenta-se em seguida a metodologia de inspecção e diagnóstico em estruturas de madeira:

#### a) Investigação Histórica

Antes de se iniciar qualquer inspecção devem-se reunir todas as informações possíveis acerca da construção que se irá visitar. A investigação histórica, terá que compilar informação acerca da concepção da construção, e sobre os fenómenos a que esteve sujeita. Na análise documental deverá ser prestada uma atenção especial a referências a anteriores problemáticas, tais como, obras de reparação, alterações estruturais, acidentes, ou seja, todas as situações que possam ter conduzido à situação actual. A obtenção dos desenhos originais ou actuais, é importante para o processo de inspecção.

Resumindo, a investigação histórica deve compilar os seguintes elementos:

- dados históricos do edifício;
- data de construção;
- desenhos originais;
- descrição dos sistemas e pormenores construtivos;
- alterações estruturais e funcionais;
- acidentes ocorridos;
- danos identificados;
- reparações efectuadas;
- desenhos actuais.

#### b) Caracterização da zona envolvente

Deve-se fazer-se uma primeira visita ao local visitando a zona envolvente, procurando-se pela existência de árvores, de rios ou ribeiros, minas de água, ou até mesmo ambiente marinho (ver Figura 6.11). A proximidade destas zonas pode ser prejudicial, principalmente das zonas húmidas. A importância desta informação relaciona-se com a possibilidade da existência de térmitas, em solos húmidos é mais frequente o seu aparecimento. Em relação às árvores, os locais com maior quantidade de vegetação potenciam uma maior concentração de insectos.

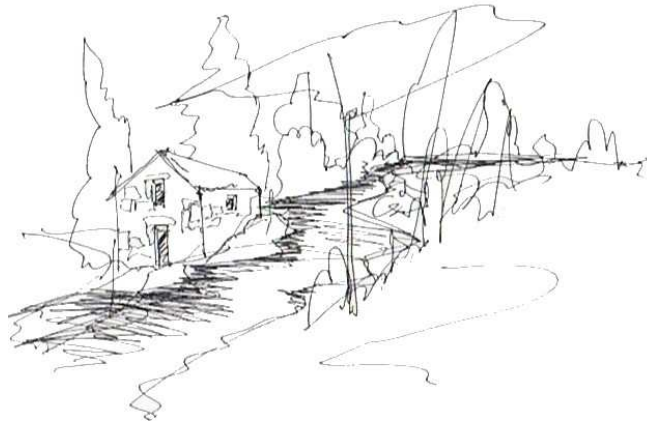


Figura 6.11 - Caracterização da zona envolvente de uma construção.

Resumindo, a caracterização da zona envolvente deve:

- verificar a proximidade de florestas;
- verificar a proximidade de cursos de água ou ambiente marinho (rio, ribeiros, minas e proximidade ao mar).

### c) Caracterização da construção

Esta etapa corresponde à caracterização geral da construção, definindo-se a orientação das fachadas, os pormenores construtivos, o estado de conservação das mesmas, integridade das juntas, e o estado da caixilharia. A observação detalhada da fachada proporciona que se verifique desde logo se existe alguma zona de infiltração de água ou com problemas estruturais, como nas situações em que os panos de parede em alvenaria resistente que possuem deformações para fora do seu plano, pondo em risco a estabilidade da estrutura interior. Deve existir uma maior preocupação com as fachadas voltadas para os ventos dominantes, estas têm uma maior probabilidade de possuírem infiltrações de água [6.07].

Ainda nesta fase é conveniente averiguar o espaço interior da construção e o estado de conservação da cobertura. No interior deve-se registar qual a constituição da estrutura dos pavimentos e das paredes, tal como procurar detalhes construtivos e, verificar o estado da caixilharia. Relativamente à cobertura, é crucial verificar-se o estado de conservação, normalmente é pela cobertura que as infiltrações de água começam. As caleiras devem estar em bom estado e desentupidas, as telhas devem estar com as sobreposições adequadas e em bom estado de conservação, os panos não devem possuir deformações exageradas. Pelo interior a cobertura deve estar bem ventilada, quer nos apoios, quer na parte do forro, tal como para o resto, os possíveis pontos de infiltração devem ser procurados.

Resumindo, a caracterização da construção deve identificar:

- materiais constituintes da fachadas;
- orientação das fachadas;
- pormenores construtivos (cornijas, varandas, palas);
- estado de conservação das fachadas;
- integridade das juntas do material de revestimento ou da alvenaria de pedra;
- estado de conservação da caixilharia;
- deformações nas fachadas;
- constituição da estrutura dos pavimentos interiores;
- definição das paredes resistentes;
- constituição da cobertura;
- estado de conservação da cobertura (caleiras, tubos de queda, telhas, entre outros);

- existência de ventilação da cobertura.

#### d) Definição da zona a inspeccionar

Para a análise dos elementos, selecciona-se apenas o que é estritamente necessário, incidindo-se a inspeção nas zonas de maior risco de sofrerem qualquer tipo de patologia [6.07]. Consideram-se zonas de maior risco todos os locais sujeitos a possíveis fontes de humidade, como por exemplo, elementos em contacto com o solo (vigas de fundação, pilares, entre outros), elementos apoiados em muros ou paredes, e elementos de estrutura em coberturas. Estes locais proporcionam um ambiente favorável ao desenvolvimento de fungos e insectos xilófagos. Se nas zonas de maior risco a madeira se encontrar em bom estado, os restantes elementos provavelmente não possuem danos, logo também estarão em bom estado. É prudente, pelo menos averiguar de forma sintética os elementos que não se localizem em zonas de risco. Após a definição dos locais e elementos a inspeccionar deve-se realizar a planificação da inspecção, englobando todas as etapas até à sua conclusão, prevendo-se todas as medidas necessárias à sua concretização.

Resumindo, as zonas a inspeccionar devem ser:

- elementos em contacto com o solo;
- elementos apoiados em muros e paredes;
- elementos da estrutura da cobertura.

#### e) Acesso aos elementos a inspeccionar

Após a definição da zona a inspeccionar, é preciso averiguar-se a necessidade de quais são os equipamentos que permitam que o técnico consiga chegar aos elementos a ensaiar, como por exemplo, escada metálica, andaimes, plataformas elevatórias, gruas telescópicas, entre outros. Para além do acesso aos elementos, estes têm que se encontrar à vista do técnico, caso contrário deverão ser previstos meios de colocar os elementos à vista, como por exemplo, extracção do soalho junto aos apoios para análise da entrega das vigas nas paredes (ver Figura 6.12), e remoção do estuque dos tectos para acesso às vigas

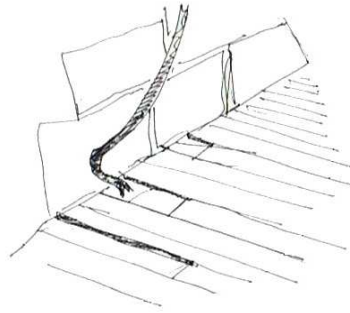


Figura 6.12- Extração do soalho junto às paredes para acesso à entrega das vigas.

Resumindo, o acesso aos elementos a inspeccionar deve prever:

- acesso directo à estrutura;
- utilização de escada metálica (opcional);
- utilização de andaimes (opcional);
- utilização de plataformas elevatórias (opcional);
- utilização de guas telescópicas (opcional).

#### f) Iluminação

O local deverá estar bem iluminado, devendo ser previsto a aplicação de iluminação artificial através de projectores ou holofotes. Mesmo assim, deverá ser utilizada uma lanterna para se focar zonas escuras ou de difícil acesso (ver Figura 6.13).

Resumindo, para a iluminação deve-se prever:

- utilização projectores;
- utilização de holofotes (opcional);
- utilização de lanterna.

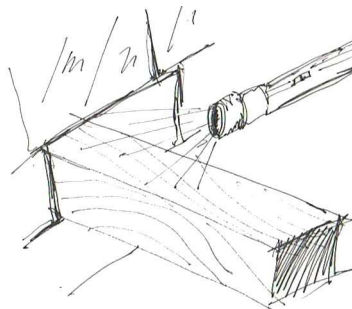


Figura 6.13 - Utilização de lanterna para apoio à inspecção visual.

g) Levantamento geométrico da estrutura a analisar

Registar todas as dimensões dos elementos da estrutura, definindo-se a secção, o comprimento e o afastamento aos outros elementos. A elaboração de um esquiço da planta estrutural permite que se numerem os elementos, facilitando o registo da informação de cada um. O levantamento pode ser realizado com recurso a fita métrica (ver Figura 6.14a), a distanciómetro laser (ver Figura 6.14b) e a equipas de topografia caso seja necessário.

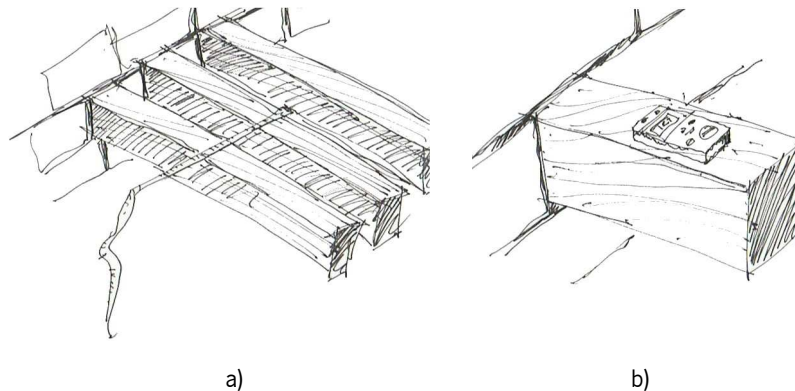


Figura 6.14 - Levantamento geométrico da estrutura: a) com recurso a fita métrica; b) com recurso ao distanciómetro laser.

Resumindo, o levantamento geométrico da estrutura deve prever:

- elaboração de um esquiço da planta estrutural;
- numeração de todos os elementos;
- utilização de fita métrica;
- utilização de distanciómetro laser (opcional);
- utilização de equipas de topografia (opcional).

h) Identificação da espécie de madeira

Esta actividade pode ser complexa quando a espécie de madeira não é perceptível de ser associada a outras, porém, a identificação pode-se fazer através da observação da secção transversal caso seja possível, ou se não houver outra hipótese, através da observação da secção tangencial. Existe bibliografia da área que estabelece uma metodologia para determinar qual a espécie com base na identificação dos parâmetros da chave de identificação. Ou quando possível, com auxílio de uma lâmina corta-se um pedaço de madeira e compara-se com um mostruário de madeiras até encontrarmos a espécie de madeira a que corresponde. O método mais fiável é o da análise microscópica.

Resumindo, para identificação da espécie de madeira deve-se:

- observar a secção transversal;
- observar a secção tangencial;
- cortar um pedaço de madeira para análise comparativa com amostras de várias espécies (opcional);
- análise microscópica (opcional).

i) Estabelecimento de uma rotina de inspecção

A metodologia de inspecção é sempre adaptada à realidade do local a analisar, mas o procedimento deve ser dividido em partes desenvolvidas metodicamente. O estabelecimento de rotinas de inspecção ajuda na futura elaboração do relatório, caso existam falhas ou dados desconhecidos, estes serão fáceis de detectar. As rotinas podem ser por exemplo, o estabelecimento de uma análise de cima para baixo, da esquerda para a direita, e rotação segundo o sentido dos ponteiros do relógio [6.02].

Resumindo, para estabelecimento de uma rotina de inspecção deve-se:

- definir o avanço da inspecção (cima para baixo, por exemplo);
- definir a sequência de inspecção dos elementos (esquerda para a direita);
- definir a sequência em relação a toda a área (rotação segundo o sentido dos ponteiros do relógio).

j) Observação visual prévia

Antes de se efectuar qualquer limpeza à superfície dos elementos, estes podem estar cobertos de pó ou de lixo, é boa prática observarem-se os vários elementos e procurar-se por informação que pode ser eliminada com a operação de limpeza superficial, como por exemplo, bolores, fungos de podridão, manchas de humidade, existência de serrim (cor e textura ao tacto), excrementos de insecto (cor, forma), existência de bolhas de serrim na superfície da madeira, e insectos mortos junto a janelas [6.07 ; 6.12]. Para a execução desta etapa pode ser necessário recorrer a um espelho extensível para observação das zonas inacessíveis (ver Figura 6.15).



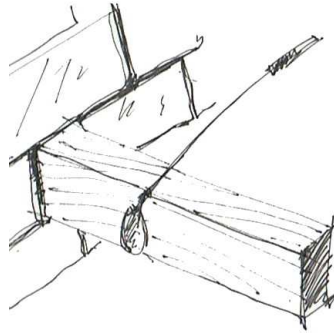


Figura 6.15 - Utilização de espelho extensível para observação de partes do elemento em zonas inacessíveis.

Resumindo, para a observação visual prévia deve-se:

- manter a camada de sujidade existente nos elementos a inspeccionar;
- procurar pela existência de bolores e fungos de podridão;
- procurar por manchas de humidade;
- procurar a existência de serrim (cor, textura);
- procurar a existência de excrementos de insectos;
- procurar a existência de insectos mortos (principalmente junto a janelas).

#### k) Limpeza da superfície dos elementos

É normal que os elementos a ensaiar se encontrem cobertos por densas camadas de sujidade, pó, detritos animais e outros, sendo necessário sempre que possível a sua remoção. A limpeza pode ser executada segundo duas formas distintas, uma consiste apenas na limpeza superficial retirando a sujidade com auxílio de uma escova macia vegetal ou sintética (ver Figura 6.16), preservando a integridade total do elemento sem o riscar, ou danificar. A outra consiste numa limpeza grosseira, mais profunda, com uma lâmina ou formão, em que se remove a parte superficial da madeira que se encontrar deteriorada [6.11]. Isto permite avaliar a secção resistente real, e o aspecto da madeira sã. Esta operação é considerada agressiva, alterando por completo a estética dos elementos, deixando-os descaracterizados. Não é de todo uma abordagem corrente na análise de edifícios históricos, devendo ocorrer apenas quando estritamente necessária.

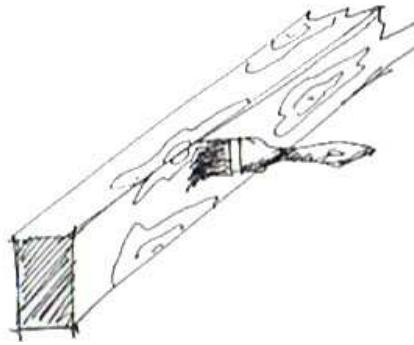


Figura 6.16 - Limpeza da superfície da madeira com escova macia.

Resumindo, para a limpeza da superfície dos elementos deve-se:

- utilizar uma escova macia vegetal ou sintética;
- utilizar uma lâmina ou o formão para limpeza grosseira.

#### l) Identificação das características físicas dos elementos

Após a limpeza superficial, reúnem-se as condições para se proceder à caracterização do elemento de madeira relativamente à cor, existência de nós e suas dimensões, inclinação do fio com auxílio de um riscador, existência de fissuras e suas dimensões, descaio da madeira, e presença de bolsas resinosas (ver Figura 6.17.a) [6.11]. O registo e o detalhe destas características são importantes para uma posterior verificação estrutural, podendo-se utilizar uma lupa para uma melhor visualização (ver Figura 6.17b).

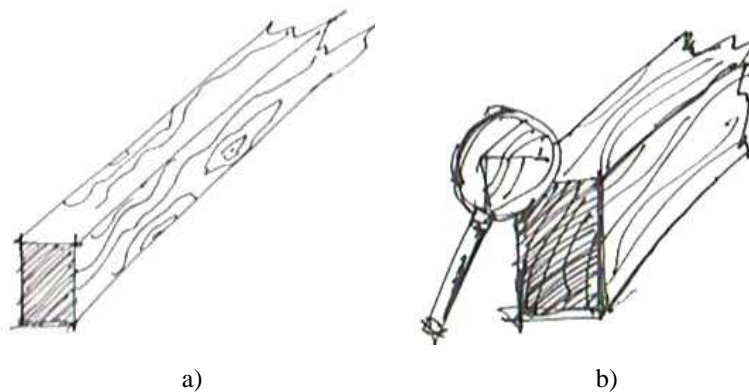


Figura 6.17 - Identificação das características físicas dos elementos: a) visualização de nós, e do fio; b) utilização de lupa.

Resumindo, para a identificação das características físicas dos elementos deve-se:

- utilizar uma lupa para uma melhor observação;
- caracterizar a cor da madeira;

- caracterizar a inclinação do fio com recurso a um riscador;
- identificar e caracterizar a existência de fissuras (comprimento, largura e profundidade);
- caracterizar o descaio da madeira;
- identificar a presença de bolsas resinosas;
- identificar a presença de nós, determinando o diâmetro.

m) Caracterização da ventilação dos apoios dos elementos e observação de deformações

A ventilação dos apoios dos elementos é relevante, a inexistência de ventilação nestas zonas poderá conduzir a que no futuro os elementos possam estar degradados mesmo que ainda não o estejam no momento da inspeção. A ventilação dos apoios verifica-se pelo espaço livre em redor do elemento na entrega na parede ou pavimento (ver Figura 18.a), e quando não existe, o elemento encontra-se totalmente envolvido pela parede ou pavimento (ver Figura 18.b).

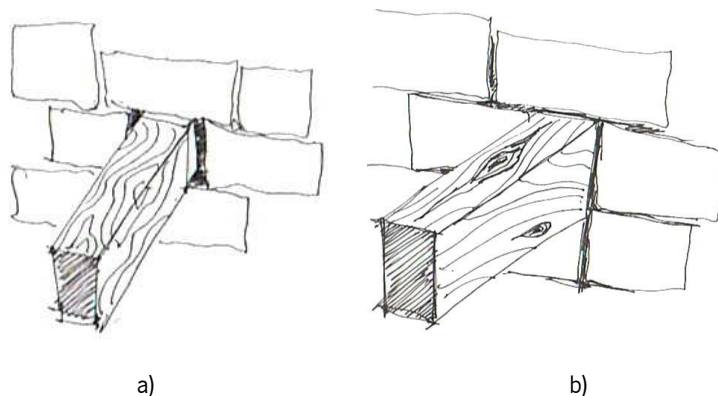


Figura 6.18 - Identificação da ventilação dos apoios: a) apoio bem ventilado; b) apoio mal ventilado.

Deve-se verificar se a flecha atingida pelas vigas das estruturas de pavimento ou de coberturas (ver Figura 19) é excessiva. É comum que as estruturas de madeira ganhem deformações mas quando atingem valores excessivos, podem originar danos em paredes interiores, infiltrações de água, entre outros.

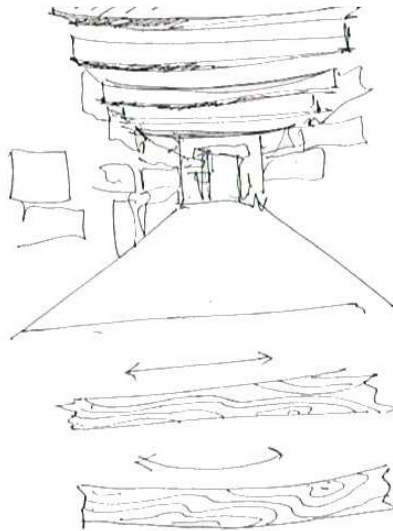


Figura 6.19 - Identificações de deformações nos elementos, medição da flecha a meio vão.

Resumindo, para a caracterização da ventilação dos apoios dos elementos e observação de deformações deve-se:

- verificar se os elementos na entrega das paredes, ou dos muros, se encontram totalmente embebidos, ou se têm algum espaço livre;
- verificar a flecha nas estruturas dos pavimentos e coberturas.

#### n) Identificação de ataques biológicos

A presença de ataques biológicos assume um papel importante para o diagnóstico de estruturas de madeira, estes podem provocar graves danos aos elementos (ver Figura 6.20). Relativamente aos ataques biológicos, devem-se caracterizar os seguintes parâmetros:

- procurar por orifícios de saída, caracterizar a sua forma (circular ou elíptica), medir o seu diâmetro, e registar a localização das zonas mais atacadas;
- procurar pela existência de serrim, identificar a cor, a textura e forma;
- procurar pela presença de fungos, identificar a cor, a forma, a textura do corpo de frutificação e a extensão do ataque;
- registar todas zonas afectadas pela acção dos agentes biológicos, identificando a extensão do ataque, bem como a sua profundidade;
- procurar pela existência de galerias internas na madeira, verificando a sua direcção em relação às fibras longitudinais;
- procurar pela presença de excrementos, caracterizando-se a cor, a forma e a consistência;

- procurar pela existência de asas soltas, a sua confirmação indica a presença de térmitas no local;
- utilizar o olfacto para detectar o cheiro a terra húmida, esta confirmação indica pode indicar a presença de térmitas.

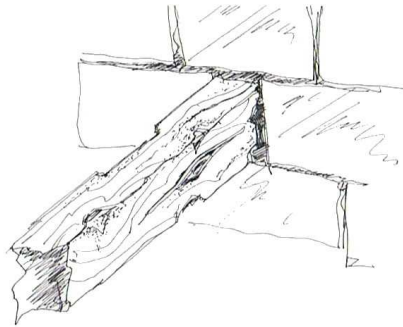


Figura 6.20 - Aspecto de uma viga atacada por caruncho.

Os ataques biológicos, nomeadamente relativamente ao caruncho, só são identificados quando o insecto já não se encontra no interior da madeira. A dificuldade existe em saber se o insecto ainda está activo no elemento de madeira em estudo, ou se o ataque já cessou. A confirmação de um ataque activo pode ser realizada através da aplicação de folhas de papel a envolver toda a peça de madeira. As folhas deverão estar livres de substâncias ácidas, devendo estar limpas e bem fixas à superfície da madeira. Caso o ataque esteja activo as folhas aparecerão furadas [6.13]. Esta técnica apenas apresenta resultados nos meses em que os indivíduos adultos deixam a madeira (Março a Junho, dependendo das espécies). Outra abordagem possível consiste em taparem-se os orifícios de saída com verniz, de forma a que o aparecimento de novos orifícios sejam facilmente distinguíveis dos existentes [6.13].

Com o desenvolvimento da indústria química, actualmente já é possível utilizarem-se feromonas para armadilhas de captura de caruncho. As feromonas são constituídas por químicos dispersos por insectos sexualmente maduros, de forma a atraírem o sexo oposto. As feromonas são colocadas no centro de uma armadilha com a parte inferior totalmente preenchida por cola, ou dentro de uma espécie de gaiola, os insectos ao serem atraídos ficam presos no local. É um método fácil e útil para detecção de infestações activas.

Os fungos de podridão, localizam-se nas partes mais húmidas, menos ventiladas e mais sombrias,

como em desvãos, sótãos, entrega das vigas em paredes ou muros, e em elementos próximos do solo [6.14].

Caso existam suspeitas da existência de térmitas na estrutura em análise, estas normalmente podem ser detectadas nas portas e guarnições interiores do pavimento térreo. As térmitas escolhem percursos internos de acesso aos elementos de madeira [6.07]. O som a "oco" com a pancada de um martelo, comprova a existência de galerias na madeira.

o) Verificação de existência de humidade

Os elementos quando observados podem possuir manchas evidentes de humidade actual, ou manchas correspondentes a humidade que foi secando, restando os vestígios das impurezas presentes na água. Devem ser registados os locais que confirmam a presença de humidade, devendo se fazer referência à antiguidade.

A confirmação de infiltrações de água no interior da estrutura pode ser rapidamente detectada logo após ter chovido, período ideal para uma fácil detecção de infiltração directa. Para averiguação de infiltrações também se pode recorrer à observação dos elementos metálicos existentes na madeira em estudo, procurando-se pela oxidação dos mesmos, pregos ferrugentos denunciam humidade excessiva, e quando os pregos se encontram salientes significa que ocorreram expansões e retracções no elemento [6.14].

Resumindo, para a verificação de existência de humidade deve-se:

- procurar a existência de manchas nos elementos, identificando os locais onde existam;
- observar a estrutura num dia de chuva;
- verificar se os pregos e ligações metálicas se encontram enferrujados;
- verificar se os pregos da estrutura se encontram salientes.

p) Análise visual com recurso ao martelo e ao formão

A inspecção visual pode ser auxiliada pela utilização de um martelo normal, sendo preferível a utilização dos martelos de borracha para se evitarem riscos nas vigas. A aplicação de pancadas do martelo ao longo do elemento vai devolvendo uma resposta do nível de deterioração do elemento

(ver Figura 6.21.a), um som forte com produção de eco significa que a madeira está sã, em bom estado, um som a "oco", "abafado", indica madeira degradada. Apesar da simplicidade do ensaio, este contribui com informação relevante, devendo ser utilizado em conjunto com outros ensaios para determinação do estado de conservação do elemento.

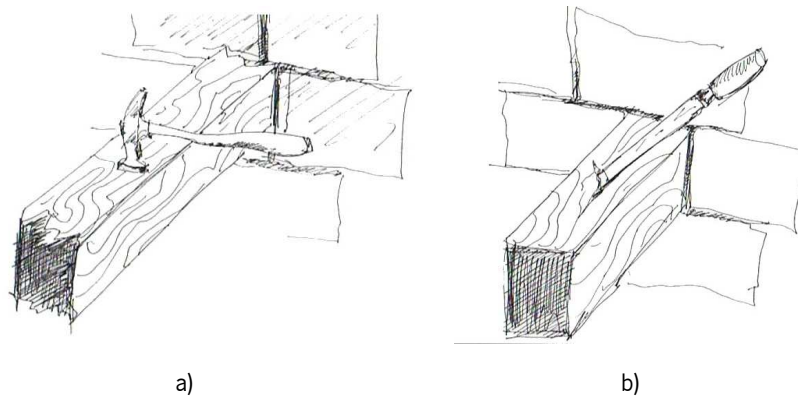


Figura 6.21 - Ferramentas de auxílio à inspeção visual: a) utilização de martelo; b) utilização de formão.

O formão, tal como o martelo, é uma ferramenta de simples utilização, que desempenha um papel importante na inspeção visual. A raspagem do formão na superfície da madeira indica se a mesma se encontra com a sua superfície degradada. O formão consegue caracterizar a profundidade do ataque instalada no elemento em estudo. Possibilita determinar se a madeira se encontra na presença de fungos de podridão quando estes ainda não desenvolveram corpos de frutificação. Raspando-se o formão na superfície da madeira de forma a levantar uma lasca de madeira, a forma e tamanho da lasca indicam-nos se existe um início de ataque de fungos, isto é, lascas longas e planas indicam madeira sã, lascas enroladas e curtas indicam a presença de madeira amolecida por fungos de podridão [6.06].

Resumindo, para a análise visual com recurso ao martelo e ao formão deve-se:

- aplicar pancadas com o martelo no elemento a ensaiar;
- raspar o formão na superfície do elemento a ensaiar.

#### q) Determinação do teor em água

A determinação do teor em água é efectuada com recurso ao higrómetro. Para elementos de madeira dura o higrómetro utilizado convém ter acoplado o eléctrodo de percussão, facilitando assim a penetração e a extracção dos eléctrodos da madeira (ver Figura 6.22). A dimensão dos eléctrodos tem que ser adequada à dimensão da peça a ensaiar, sendo necessário que estes

penetrem todo o seu comprimento na madeira. O higrómetro terá que ser ajustado à espécie de madeira do elemento em estudo e, à temperatura do local de inspecção.

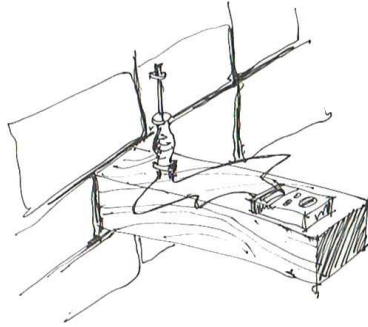


Figura 6.22 - Utilização de higrómetro com eléctrodo de percussão.

Resumindo, para a determinação do teor em água deve-se:

- aplicar um higrómetro com eléctrodo de percussão, com pontas de eléctrodo adequadas à espessura da madeira.

#### r) Ensaio do Pilodyn

Deve-se definir o número de ensaios a efectuar-se com o Pilodyn em cada elemento, este deverá ser adequado ao grau de exigência do ensaio, quanto mais penetrações melhor é a caracterização da dureza superficial. A necessidade de vários ensaios do Pilodyn no mesmo elemento pode penalizar o aspecto final da madeira, devendo ser bem ponderado o seu benefício (ver Figura 6 23).

A informação obtida deste ensaio indica-nos que quanto mais próximas de 0 mm forem as penetrações do Pilodyn, maior é a dureza superficial da madeira. No entanto, a identificação da espécie de madeira é importante para se conseguir relacionar os valores do Pilodyn, atente-se ao seguinte exemplo, considerando-se uma viga de madeira de balsa sujeita à penetração com o Pilodyn, cujo resultado final é a penetração total da madeira. Neste caso, a balsa apesar de estar em bom estado não possui uma dureza superficial suficiente para resistir ao impacto do Pilodyn. Os resultados terão que ser avaliados mediante a densidade da madeira, isto é, para madeiras densas penetrações acima de 10 mm poderá ser indicador de degradação superficial, enquanto que para madeiras leves, a penetração de 10 mm até pode indicar uma boa dureza superficial.

O Pilodyn funciona de forma simples, antes da aplicação recoloca-se o pino no interior da cápsula,



esta operação prepara o Pilodyn para a penetração. Em seguida, encostam-se os pernos de apoio do equipamento à superfície da madeira e carrega-se na extremidade livre, soltando o pino de aço contra a madeira. O valor da profundidade de penetração é lido no aparelho.

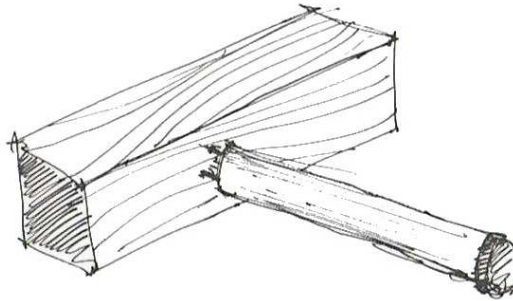


Figura 6.23 - Avaliação da dureza superficial com o Pilodyn.

Resumindo, para a aplicação do pilodyn deve-se:

- escolher os pontos de ensaio convenientes;
- aplicar o aparelho numa posição perfeitamente vertical ou horizontal.

#### s) Ensaio do Resistógrafo

O ensaio do Resistógrafo deve ser executado num local que permita a instalação do aparelho numa posição correcta, isto é, posição vertical quando os elementos a ensaiar se encontram na horizontal e, posição horizontal quando os elementos a ensaiar se encontram na vertical (ver Figura 6.24). Para se iniciar o ensaio a ponta do aparelho deve estar encostada à superfície do elemento, accionando-se então o botão de avanço da agulha. O ensaio termina ao sentir-se que a agulha perfurou o elemento na sua totalidade, accionando-se o botão de recuo da agulha. Ao apertar-se o botão de paragem da agulha o resistógrafo processa o resultado em papel, obtendo-se assim o perfil resistográfico. O perfil resistográfico apresenta a resistência oferecida pela madeira à penetração da agulha medida em bits, ao longo da profundidade de perfuração, esta medida em mm. O perfil ao apresentar valores de bits próximos de 0, indica que a madeira se encontra deteriorada, ou possui fissuras ou descontinuidades no seu interior. O perfil resistográfico que se obtém directamente do equipamento em papel, contém uma referência específica para o ensaio acabado de efectuar, e no cabeçalho do talão que contém o perfil, deve-se colocar a designação do elemento analisado. Porém, convém anotar-se num bloco de notas a referência associada ao elemento inspeccionado. Ao transferirmos os resultados do Resistógrafo para o computador, os

ficheiros encontram-se segundo a referência que aparece no talão do perfil resistográfico.

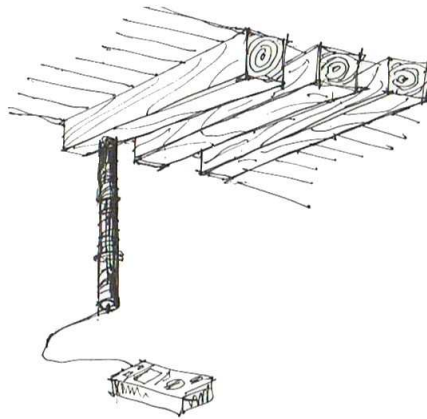


Figura 6.24 - Aplicação do Resistógrafo.

Resumindo, para a utilização do Resistógrafo deve-se:

- escolher uma zona que permita a aplicação do equipamento;
- posicionar o aparelho na vertical ou na horizontal, conforme se encontre o elemento a ensaiar;
- registar a referência do perfil resistográfico associada à designação do elemento.

#### t) Ensaio dos ultra-sons

Este ensaio normalmente necessita de duas pessoas, uma para operar com os transdutores, e outra para accionar o início e a paragem do ensaio. Antes de se iniciar é importante, definir-se qual o método de ultra-sons a aplicar, considerando-se as condicionantes próprias de um edifício, em aplicações *in situ* apenas é possível o método indirecto ou o semi directo. Qualquer que seja o método a aplicar este deverá ser mantido para todos os elementos a ensaiar, só desta forma é estabelecido um padrão nos resultados.

Para aplicação dos transdutores é necessário colocar-se um gel de contacto na superfície dos transdutores e, na superfície da madeira onde estes irão ser aplicados (ver Figura 6.25). O contacto entre as superfícies dos objectos e do elemento deverá ser o mais perfeito possível, evitando-se zonas de faces irregulares ou de madeira muito carcomida. O incumprimento destes requisitos originará dispersões nos resultados, sendo a velocidade de propagação das ondas afectada pelo ar.

É importante que se efectuem várias leituras para o mesmo ponto, assim é possível determinar-se com alguma segurança se existiram erros humanos.

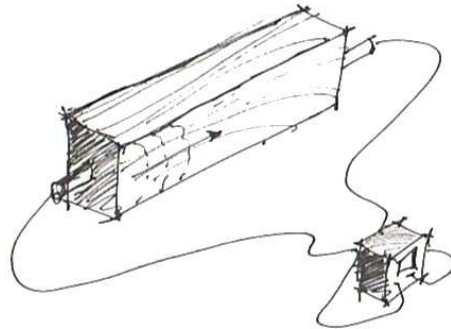


Figura 6.25 - Aplicação de ultra-sons pelo método directo.

A madeira em bom estado de conservação apresenta uma velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas superior à madeira em mau estado. Quanto mais próximas de 0 forem as velocidades, mais degradada se encontra a madeira, ou possui vazios no seu interior que retardam as ondas ultra-sónicas. Este ensaio deverá ser sempre relacionado com os resultados dos ensaios anteriores, de forma a analisarem-se se as zonas hipoteticamente degradadas efectivamente o são.

O afastamento entre os transdutores não pode ultrapassar o afastamento máximo indicado pelo fabricante. Cada fabricante tem os seus requisitos podendo variar o afastamento para aparelhos diferentes.

Resumindo, para o ensaio dos ultra-sons deve-se:

- utilizar dois operadores;
- colocar gel de contacto nos transdutores e nos pontos da superfície da madeira onde serão aplicados os transdutores;
- realizar várias leituras para o mesmo ponto;
- escolher faces planas;
- aplicar a mesma pressão nos transdutores.

#### u) Estado das ligações entre elementos

Por último, é conveniente verificarem-se todas as ligações entre os diversos elementos (ver Figura 6.26), principalmente em estruturas de cobertura, analisando os entalhes, as peças metálicas e a

madeira na zona de ligação dos elementos. Esta análise pode ser efectuada com recurso ao formão e ao martelo, caso existam dúvidas acerca do seu estado, então utilizar-se-á outro dos métodos não destrutivos.

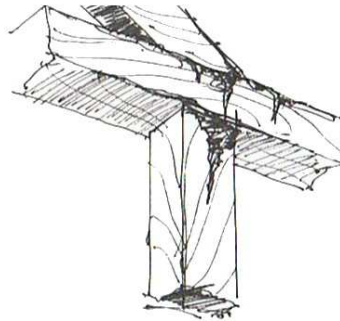


Figura 6.26 - Pormenor de ligação entre elementos diferentes.

Resumindo, para o estado das ligações entre elementos deve-se:

- inspecionar as zonas de encontro entre os elementos;
- utilizar o martelo e o formão para apoio à inspecção visual;
- utilizar em caso de dúvida algum dos ensaios não destrutivos;
- observar o aspecto das ligações metálicas.

#### v) Análise dos Resultados e Conclusões

A análise dos resultados é muito importante para definição de um diagnóstico correcto e eficaz, deve-se por isso prestar especial atenção à relação entre os diversos ensaios. A elaboração de um quadro comparativo dos diversos resultados obtidos para os diferentes ensaios, auxilia na sua interpretação. As conclusões acerca do estado de conservação dos elementos de madeira devem ser tomadas com segurança, sendo preferível a adopção de uma postura conservativa, salvaguardando a segurança do edifício.

A identificação das zonas dos elementos deterioradas, determinada pela inspecção visual, deve ser comparada, para as mesmas zonas, com os restantes ensaios, medição do teor em água, penetração com o Pilodyn, perfil resistográfico e velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas. Se existirem discordâncias entre os diferentes ensaios significa que poderão ter ocorrido falhas por parte do operador, ou a própria madeira introduziu desvios.

Após a análise dos resultados, deverá ser elaborado um quadro resumo onde constam todos os elementos inspeccionados e a respectiva caracterização do estado de conservação, assinalando-se os elementos a manter, a substituir na totalidade, ou a substituir parcialmente.

Resumindo, para a análise dos resultados e conclusões deve-se:

- apresentar quadro resumo com todos os resultados dos ensaios;
- apresentar quadro resumo com os resultados da inspecção visual;
- analisar os resultados entre os diferentes ensaios e a inspecção visual;
- apresentar quadro resumo com a caracterização do estado de conservação dos elementos inspeccionados, fazendo-se referência aos elementos que se devem manter, e aos que deverão substituídos total ou parcialmente.

## 6.4 Bibliografia - Capítulo 6

- [6.01] CÓIAS, VÍTOR ; 2007 - *Reabilitação estrutural de edifícios antigos. Alvenaria/madeira técnicas pouco intrusivas*. Argumentum e GeCorpa, Lisboa.
- [6.02] FEILDEN, BERNARD ; 2003 - *Conservation of historic buildings*. 3ª ed. Architectural Press, Grã-Bretanha.
- [6.03] SANTOS, S. POMPEU ; 2003 - *A reabilitação estrutural do património construído - Aspectos básicos*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa.
- [6.04] TRADA ; 2004 - *Non-destructive testing of timber*. in Woodinformation. Reino Unido.
- [6.05] FEIO, ARTUR ; 2007 - *Ensaio não destrutivo em estruturas de madeira - Métodos globais de ensaio*. in Engenharia e Vida, n.º 30, Lisboa.
- [6.06] BRE PRESS ; 1997 - *Wood rot : assessing and treating decay*. in Good Repair Guide 12, Grã-Bretanha.
- [6.07] ARRIAGA, FRANCISCO ; BOBADILLA, IGNACIO ; ESTEBAN, MIGUEL ; GARCIA, FRANCISCO ; PERAZA, FERNANDO ; 2002 - *Intervención en estructuras de madera*. AITIM, Madrid.
- [6.08] CACHIM, PAULO B. ; 2007 - *Construções em madeira - A madeira como material de construção*. Publindústria, Porto.
- [6.09] FEIO, ARTUR ; 2007 - *Ensaio não destrutivo em estruturas de madeira - Métodos locais de ensaio*. in Engenharia e Vida, n.º 31, Lisboa.
- [6.10] MACHADO, J. S. ; CRUZ, H. ; 1997 - *Avaliação do estado de conservação da estrutura de madeira. Determinação do perfil de densidade por métodos não destrutivos*. in Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas, n.º 42.
- [6.11] FEIO, ARTUR ; 2007 - *Reabilitação de estruturas de madeira. Diagnóstico e inspeção (parte I)*. in Engenharia e Vida, n.º 28, Lisboa.
- [6.12] SÁNCHEZ, FERNANDO ; 2001 - *Protección preventiva de la madera*. AITIM, Madrid.
- [6.13] RIDOUT, BRIAN ; 2000 - *Timber decay in buildings - The conservation approach to treatment*. English Heritage ; Historic Scotland, London.
- [6.14] APOLO, GERONIMO ; LUENGAS, ALFONSO ; 1995 - *Curso técnicas de intervención en el patrimonio arquitectónico. Tomo 1 - reestructuration en madera*. Gijón.

## 7. CASO DE ESTUDO - MOSTEIRO DE SANTA MARIA DE POMBEIRO

### 7.1 Objectivo

O presente caso de estudo tem como propósito servir como exemplo prático de como se deve abordar uma inspecção e diagnóstico *in situ* de uma estrutura de um pavimento de madeira, tendo por base os conceitos teóricos apresentados em capítulos anteriores, concluindo-se acerca do estado de conservação do vigamento de madeira. Os ensaios realizados *in situ* ajudam a definir quais os ensaios mais adequados às características de cada elemento, ao mesmo tempo que permitem entender, qual a ligação entre eles e de que forma revelam uma maior ou menor fiabilidade na conclusão do estado de conservação da peça.

### 7.2 Enquadramento Histórico

O Mosteiro de Santa Maria de Pombeiro (ver Figura 7.1) localiza-se na freguesia de Riba Vizela, no concelho de Felgueiras, distando 19 km de Guimarães e 3 km de Felgueiras. Está inserido no fundo de um pequeno vale junto à margem do rio Vizela [7.01].



Figura 7.1 - Mosteiro de Santa Maria de Pombeiro [7.02].

O mosteiro faz parte de um conjunto monástico constituído pela igreja românica, o claustro de traça gótica e pelos edifícios monacais. É um dos mosteiros beneditinos mais influentes, tendo sido construído segundo os padrões do Românico Beneditino, notório nas três naves de quatro tramos e cabeceira tripartida da igreja [7.03].

Terá sido fundado entre os séc. X e XI por D. Gomes Eanes Echigues [7.01], num local onde outrora já teria sido edificado um mosteiro beneditino no lugar de Sobrado, restando apenas vestígios da sua existência em pequenos blocos de pedras que aparecem na remoção das terras dos campos contíguos.

Em meados de 1427, o mosteiro inicia o seu período de ruína física perdurando até ao séc. XVI [7.04]. Só em 1569 é que o mosteiro torna a ser reconstruído, sendo criado um conjunto arquitectónico de grandes dimensões, dispondo os edifícios em redor de um claustro com 15 arcos no piso térreo e 7 janelas de sacada no primeiro [7.04].

A 13 de Maio de 1809, o mosteiro é invadido pelas tropas francesas do general Coyson, provocando um incêndio que afectou todo o complexo, com excepção da igreja que permaneceu praticamente intacta.

A 16 de Junho de 1910 é declarado monumento nacional por decreto-lei, tendo estado sobre a jurisdição da DGEMN até à sua extinção e, actualmente sobre a jurisdição do IGESPAR.

### **7.3 Levantamento Histórico de Utilizações, Patologias e Intervenções na Área de Estudo**

Como área de estudo do mosteiro escolheu-se a estrutura do pavimento do corredor de acesso às celas do 2º andar da ala poente. A ala poente está inserida num conjunto de 2 edifícios (ver Figura 7.2), o primeiro engloba a ala voltada a sul (onde se insere a zona de estudo), possuindo uma área de 13,00 x 21,30 m<sup>2</sup>, o segundo engloba a ala voltada a nascente, possuindo uma área de 9,53 x 51,58 m<sup>2</sup>. Os edifícios possuem paredes resistentes em alvenaria de granito, com cerca de 1,00 m de espessura e pavimentos em madeira, cujas vigas principais apoiam cerca de 15 a 20 cm no interior das paredes. A cobertura é constituída por um conjunto de asnas de madeira, que servem de apoio a madres e ripas, para suporte de telha cerâmica. No anexo A apresentam-se as plantas, cortes e alçados destes edifícios.

As alterações sucessivas que o mosteiro veio sofrendo ao longo de muitas décadas tiveram origem em factores de ordem estética, litúrgica, funcional, de manutenção e reparação.





Figura 7.2 - Edifícios do Mosteiro de Pombeiro pertencentes à ala poente: a) Conjunto dos 2 edifícios da ala poente [7.02] ; b) Fachada voltada a norte da ala poente.

Em 1813 os frades construíram 8 hospedarias por cima da sala do recibo (localizava-se ao lado da portaria na parte térrea do edifício da área de estudo) , 4 no primeiro piso e 4 no segundo [7.05]. Com a informação aqui apresentada conseguimos definir que a área de estudo, localizada no 2º piso do maior edifício assinalado na Figura 7.2, consistia num corredor de acesso a 4 celas que serviam como quartos para visitantes, situação análoga ao piso inferior. Na Figura 7. observa-se a planta da zona da área de estudo.

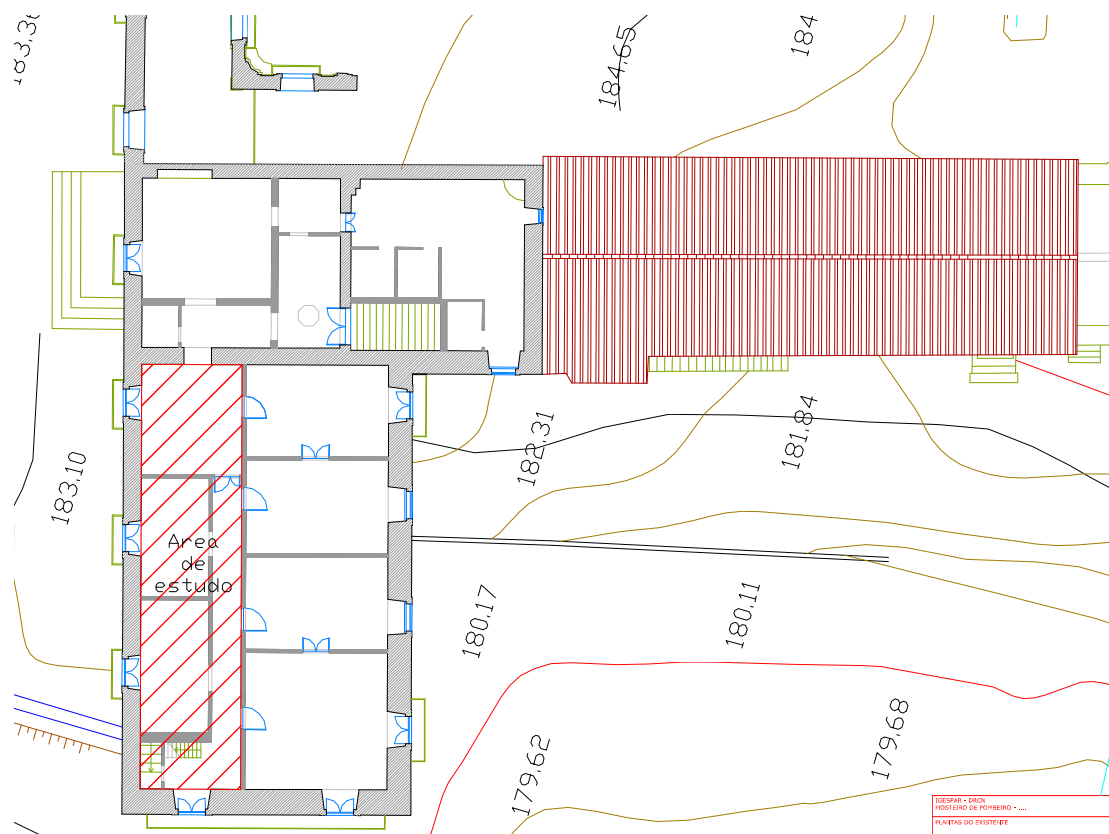


Figura 7.3 - Planta do 2º piso da ala poente assinalando a área de estudo.

## 7.4 Caracterização da Área de Estudo

Tal como já foi referido a área de estudo localiza-se na ala poente do Mosteiro de Pombeiro, no 2º piso por cima da portaria, e consiste num corredor de acesso às celas outrora utilizadas pelos frades para dormitório (ver Figura 7.4a). O corredor tem 4,00 m de largura livre interior, 20,00 m de comprimento, e 2,91 m de pé direito livre. Situa-se entre as paredes resistentes exteriores em alvenaria de granito, da fachada voltada a norte da ala poente e as paredes resistentes interiores em alvenaria de granito que delimitam o espaço interior das celas.

O pavimento é constituído por vigas principais em madeira de carvalho, na sua maioria de secção rectangular, com dimensões médias de 16 x 17 cm<sup>2</sup>, com um afastamento médio de 60 cm entre si. Entre vigas principais existem vigas secundárias, também em madeira de carvalho, na sua maioria de secção quadrada, com dimensões médias de 8 x 8 cm<sup>2</sup>, com um afastamento médio de 30 cm às vigas principais. Quer as vigas principais, quer as vigas secundárias, encontram-se apoiadas cerca de 15 a 20 cm nas paredes laterais. A meio vão existe um travamento transversal entre vigas principais, em madeira de carvalho, disposto em todo o comprimento do corredor, com a particularidade de alternar o sentido de inclinação em cada par de vigas. Apresenta na sua maioria secção rectangular, com dimensões médias de 8 x 14 cm<sup>2</sup>. Sobre o vigamento assentam tábuas de soalho em madeira de carvalho com 3 cm de espessura. Na Figura 7.4b observam-se as vigas principais, vigas secundárias e vigas transversais, que constituem a estrutura do pavimento.



Figura 7.4 - Área de estudo: a) vista inferior da estrutura do pavimento do corredor de acesso às celas do 2º piso ;  
b) Pormenor da estrutura do pavimento (vigas principais, secundárias e transversais).

O levantamento das dimensões dos elementos estruturais foi efectuado pelo piso inferior com

recurso a uma escada de alumínio, fita métrica de metal e distanciómetro laser. Serão apresentadas as dimensões de todos os elementos estruturais pertencentes à área de estudo. Devido às irregularidades dos vãos, consideram-se as dimensões médias dos elementos. Na Figura 7.5 pode observar-se a planta estrutural da área de estudo com a designação de todas as vigas principais, os dados geométricos das vigas poderão ser consultados na Tabela 7.1.

Tabela 7.1- Dados Geométricos das Vigas Principais da Área de Estudo.

Designação do elemento	Comprimento (m)	Dimensões (cm)	Forma da secção
V1*	4,08	14 X 19	Rolada
V2*	4,08	19 X 18	Rectangular
V3*	4,08	12 X 18	Rectangular
V4*	4,08	16 X 17	Rectangular
V5*	4,08	18 X 15	Rectangular
V6*	4,08	19,5 X 18,5	Rectangular
V7*	4,08	16 X 18	Rolada
V8*	3,08	8 X 14	Rectangular
V9*	4,08	11 X 16	Rectangular
V10*	4,08	22 X 17	Rectangular
V11	4,08	15 x 16	Rectangular
V12	4,08	16 x 17	Rectangular
V13*	4,08	21 X 18	Rectangular
V14	4,08	21 x 18	Rectangular
V15	4,08	17 x 16	Rectangular
V16	4,08	8 x 15	Rectangular
V17	4,08	17 x 17	Rolada
V18	4,08	16 x 19	Rectangular
V19	4,08	21 x 18	Rectangular
V20	4,08	16,5 x 17	Rectangular
V21*	4,08	20 X 18	Rectangular
V22*	4,08	13 X 17	Rectangular
V23	2,89	20 x 18	Rectangular
V24*	2,89	19 X 18	Rectangular
V25*	2,89	16 X 18	Rolada
F1	2,37	22 x 18	Rectangular
F2*	2,00	16 X 17	Rectangular
F3*	2,12	16 X 16	Quadrada
F4	2,05	9 x 17	Rectangular
F5	1,06	12 x 7,5	Rolada
F6	1,14	7 x 9	Rectangular

\* Vigas inspeccionadas.

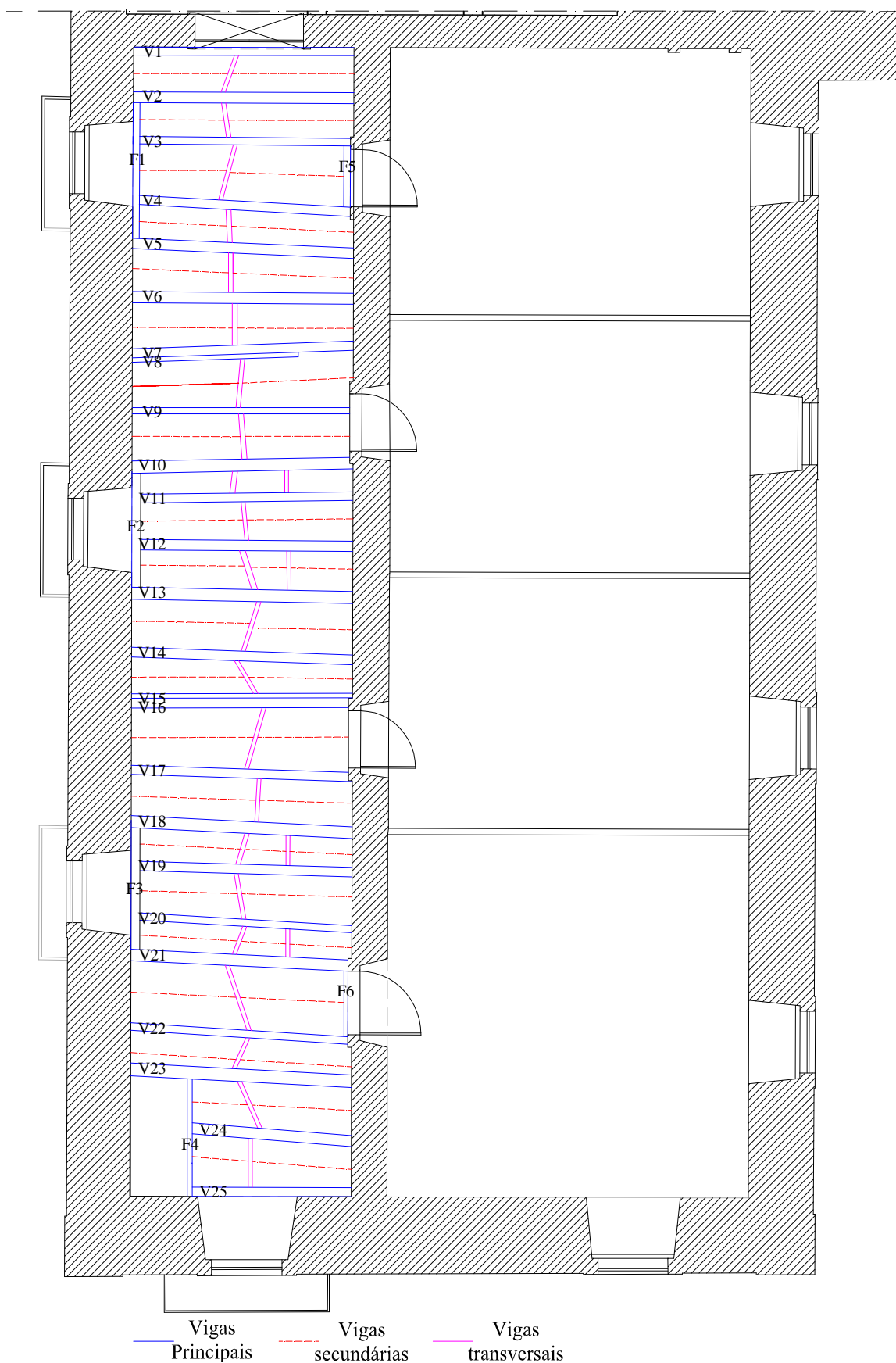


Figura 7.5 - Planta estrutural do pavimento da área de estudo.

## 7.5 Estudo de Campo

O estudo de campo consistiu na investigação, inspecção e levantamento confinado apenas ao local de estudo, de forma a conseguir-se caracterizá-lo de acordo com os objectivos propostos. O estudo de campo obedeceu a um determinado conjunto de etapas conforme se demonstra nos subcapítulos seguintes.

### 7.5.1 Metodologia da Inspeção Realizada

Será apresentado neste ponto o procedimento experimental efectuado na área de estudo, para efeito da avaliação do estado de conservação de algumas vigas principais.

#### 7.5.1.1 Selecção das Vigas a Ensaiar

Apesar da área de estudo consistir em todo o corredor do 2º piso, optou-se por seleccionar para inspecção apenas cerca de metade das vigas (17 elementos). Esta escolha foi efectuada tendo em consideração a dificuldade de execução dos ensaios, alguns deles são de uma exigência física elevada, bem como a grande quantidade de ensaios a realizar, pois cada viga é ensaiada em três pontos (ponto A, ponto B e ponto C) (ver Figura 7.6). Para a selecção das vigas considerou-se ensaiar uma parte do corredor seguida, e da parte restante seleccionaram-se vigas que visualmente estariam sãs e outras que aparentemente estariam em mau estado, proporcionando valores que permitissem critérios comparativos. As vigas seleccionadas encontram-se assinaladas na Tabela 7.1.



Figura 7.6 - Designação dos pontos inspeccionados por cada viga; a) Vigas paralelas à fachada exterior; b) Vigas que apoiam na fachada exterior e na parede divisória interior.

A designação dos pontos ensaiados é atribuída sempre da esquerda para a direita, considerando-se na situação perpendicular à fachada que o ponto A é o ponto situado junto à

parede. Os pontos A e C correspondem a pelo menos 10 cm de distância dos apoios, e o ponto B situa-se a meio vão. Apesar de serem apenas três pontos de ensaio, estes pontos são bastante representativos, perante a sua degradação a estabilidade da viga pode ser afectada. Os dois pontos das extremidades conferem o apoio, e consequentemente a transmissão de esforços, daí o seu estado de conservação ser importante. A meio vão, se existir deterioração, também podem ocorrer deformações graves conduzindo à própria rotura da estrutura.

#### 7.5.1.2 Equipamentos Utilizados

Tendo como objectivo conseguir-se um diagnóstico o mais completo possível, utilizaram-se os ensaios mais apropriados para o efeito, considerando-se apenas os equipamentos que seriam possíveis de utilizar numa abordagem prática em qualquer edifício. A Tabela 7.2, engloba tanto os equipamentos de ensaio, como equipamentos de protecção individual, ferramentas, iluminação e acesso utilizados na área de estudo, entre outros.

Tabela 7.2 - Equipamentos Utilizados na Inspeção

Capacete de protecção	Lanterna	Fita métrica de metal	Pilodyn (6J)
Óculos de protecção	Extensão eléctrica	Distanciómetro laser	Resistógrafo 3450-S
Luvas de protecção	Escovas macias	Máquina fotográfica	Ultra-sons
Escada de alumínio	Espelho extensível	Formão	Higrómetro
Projector de 500 w	Canivete	Martelo	Estação meteorológica

#### 7.5.1.3 Procedimento de Inspeção

A primeira etapa do procedimento de inspeção consistiu na reunião de documentação acerca do Mosteiro de Santa Maria de Pombeiro, para isso contactou-se a Direcção Regional de Cultura do Norte, nomeadamente a técnica responsável pelas actuais obras do mosteiro, Arquitecta Isabel Sereno.

A análise documental permitiu concluir que o mosteiro possui um nível freático muito elevado, sofreu um grave incêndio do qual resultou uma profunda reconstrução, e a estrutura existente da área de estudo terá perto de 200 anos.

Com a análise documental realizada foi necessário estudar qual o melhor acesso à área de estudo para se realizar o procedimento de inspeção, tendo-se optado por fazer pela parte

inferior do pavimento, ou seja, acedendo-se pelo piso inferior (1º piso), devido ao soalho do 2º piso se encontrar bastante deteriorado (ver Figura 7.7).



Figura 7.7 - Mau estado de conservação do soalho do 2º piso.

Apesar do local possuir boa iluminação natural, como forma de se obter uma visualização perfeita do estado superficial das vigas, montou-se um projector apontado para estas sempre que estavam a ser inspeccionadas, o que mesmo assim não evitou a utilização de uma lanterna quando necessário.

Antes de se iniciar a inspecção visual, caracterizou-se visualmente o tipo de madeira existente no local, e para tal utilizou-se a ajuda de amostras de vários tipos de madeira para se comparar com a existente. Pediu-se ajuda a um carpinteiro experiente em obras de património histórico, que se deslocou até ao local, onde identificou a madeira presente na área de estudo como carvalho (*Quercus robur L.*).

Iniciou-se a inspecção com uma observação visual das vigas sem se limpar a camada de pó que existia na superfície (ver Figura 7.8), e procurou-se a existência de serrim e de excrementos produzidos por insectos, bem como de fragmentos ou espécimes de insectos mortos, ou por qualquer outro vestígio. Como o pé direito era alto (2,91 m) foi necessário recorrer à utilização de uma escada de alumínio para se conseguir alcançar as vigas.





Figura 7.8 - Observação de viga sem limpeza da camada de detritos superficiais.

Escovaram-se superficialmente as vigas com recurso a uma escova macia, para permitir a observação da sua superfície, visualizando-se o grão, a textura, e procurando-se a existência de defeitos da madeira (nós, falhas de secção, fendas) (ver Figuras 7.9 e 7.10), a existência de manchas de humidade e deformações a meio vão. As fendas foram identificadas de uma forma mais pormenorizada, tendo sido medido a sua extensão, largura e profundidade.



a)



b)

Figura 7.9 - Identificação de defeitos da madeira: a) fenda de secagem; b) pequenos nós.



a)



b)

Figura 7.10 - Identificação de defeitos da madeira: a) falha de secção; b) nós.



Verificou-se a existência de ventilação dos apoios, observando-se se as vigas estariam completamente encastradas nas paredes de granito, sem qualquer folga (ver Figura 7.11a), ou se existia espaço livre na zona do apoio/entrega na parede (ver Figura 7.11b).



Figura 7.11 - Identificação da ventilação nos apoios; a) apoio mal ventilado; b) apoio bem ventilado.

Examinou-se o estado das vigas através das pancadas de um martelo (ver Figura 7.12a) e pela penetração de um formão ao longo de todo o comprimento (ver Figura 7.12b), incluindo a zona da entrega das vigas na parede, com o intuito de se procurar zonas deterioradas que aparentemente possam estar sãs. Relativamente ao martelo, um som oco indica-nos que a viga está deteriorada, e um som forte que ecoa indica-nos que a viga está em bom estado. Ao rasparmos o formão na viga observa-se como qual o estado superficial da viga, se existir alguma forma de degradação, esta detecta-se pela penetração do formão.



Figura 7.12 - Inspeção visual com auxílio de ferramentas; a) aplicação de pancadas de martelo para avaliação do estado das vigas; b) penetração do formão na superfície das vigas.

Procedeu-se à identificação dos ataques biológicos presentes através de observação visual com recurso a um espelho extensível. Registou-se a existência de ataques biológicos, caracterizando-

se a forma e o diâmetro dos orifícios de saída; localização dos orifícios de saída; existência de galerias internas visíveis; tipo e cor do serrim; tipo e cor do corpo de frutificação no caso dos fungos; localização e caracterização de zonas deterioradas (profundidade e extensão do ataque). Na Figura 7.13 podem-se observar os danos provocados pelo caruncho nas vigas de madeira.



Figura 7.13 - Identificação de ataques biológicos; a) madeira com os orifícios de saída do caruncho visíveis; b) madeira degradada pela acção do caruncho.

Para se determinar o teor em água nos três pontos de ensaio (A, B e C), recorreu-se à utilização de um higrómetro munido com eléctrodo de percussão, com pontas de eléctrodo de 60 mm de comprimento (apropriado para a altura média das vigas existentes). Optou-se pelo eléctrodo de percussão devido à extrema dureza da madeira de carvalho, o que aumentava a dificuldade da introdução do eléctrodo normal. Os eléctrodos foram cravados até penetrarem totalmente na viga. Escolheu-se aplicar o higrómetro na face inferior pois correspondia a uma maior facilidade na aplicação e extracção do equipamento (ver Figura 7.14). Para se iniciar a leitura do teor em água da madeira, é necessário caracterizar-se a temperatura interior, bem como converter a espécie de madeira numa classe entre 1 a 4 (de acordo com as normas do fabricante), introduzindo-se estes dados no higrómetro.

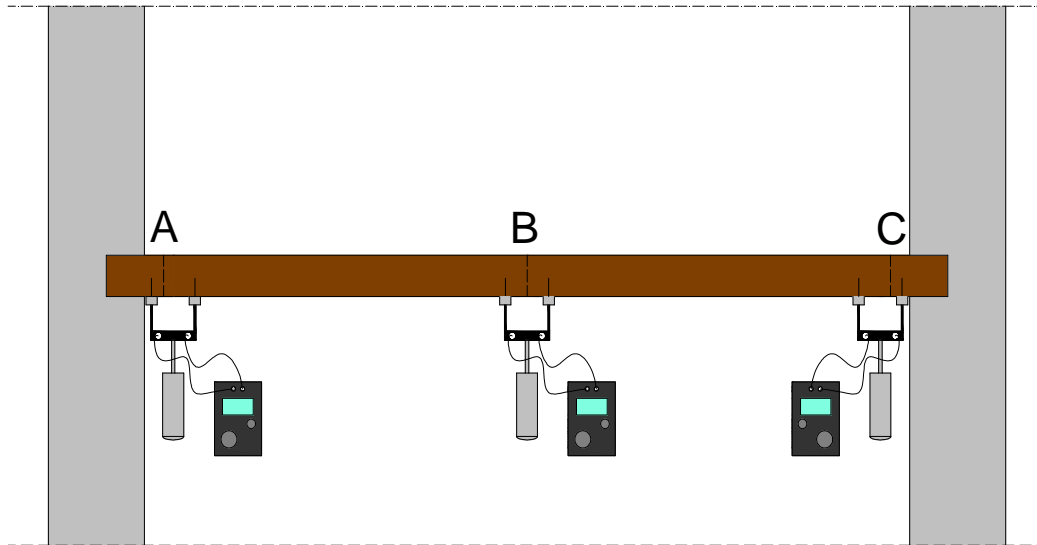


Figura 7.14 - Esquema da aplicação do higrómetro

Determinou-se a dureza superficial das vigas de madeira nos três pontos de ensaio (A, B e C) através da utilização do Pilodyn. O ensaio foi executado na face inferior da viga (ver Figura 7.15) devido a esta ser a única face acessível para se conseguir manobrar o equipamento em boas condições, a existência de vigas secundárias muito próximas das vigas principais dificulta o acesso às faces laterais. Efectuaram-se três leituras para cada ponto, tendo-se garantido a verticalidade do equipamento na penetração. Para a execução deste ensaio escolheram-se locais que não possuíssem fissuras, e nós à superfície, para que não influenciassem os resultados.

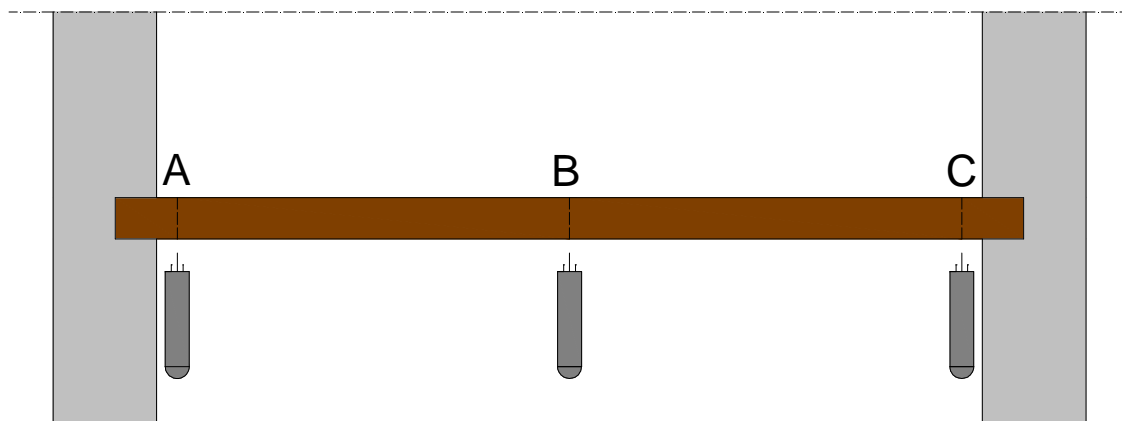


Figura 7.15 - Esquema da aplicação do Pilodyn.

Procedeu-se à utilização do Resistógrafo nos três pontos de ensaio (A, B e C) para uma avaliação da qualidade da madeira ao longo da altura da secção. O ensaio foi efectuado na face inferior da viga, sendo impossível a aplicação nas faces laterais devido ao próprio comprimento do

resistógrafo (ver Figura 7.16). Apenas se realizou uma leitura por cada ponto com este ensaio, tendo-se armazenado os resultados obtidos em papel e sem suporte digital. Na execução do ensaio garantiu-se a verticalidade do equipamento, e escolheram-se os locais de penetração que não possuíam nós à superfície nem fissuras, para não provocar a alteração da trajectória da agulha ao longo da penetração.

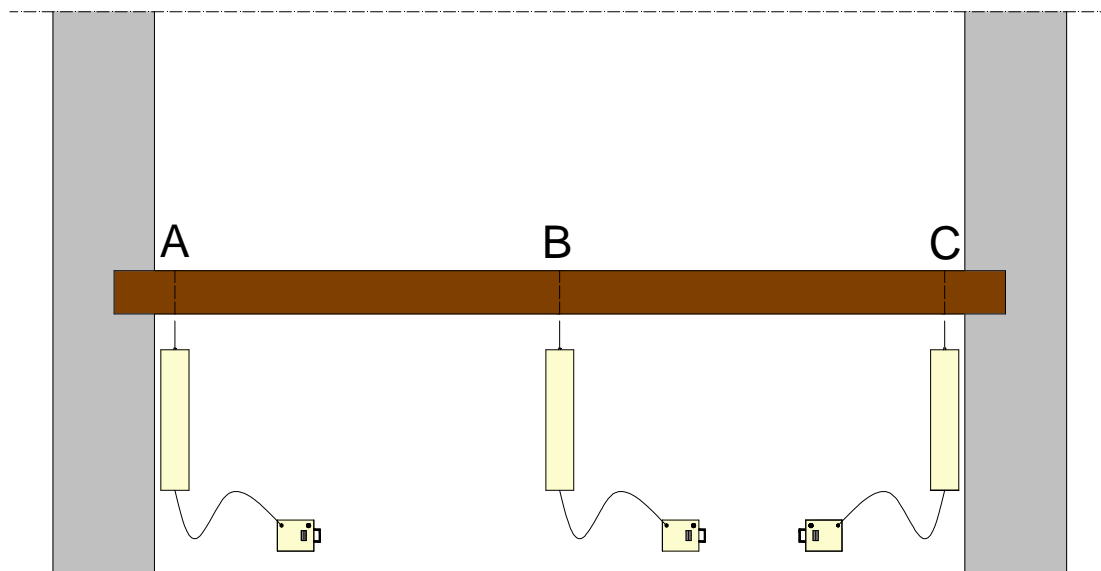


Figura 7.16 - Esquema da aplicação do Resistógrafo.

Executou-se o ensaio ultra-sónico nos três pontos de ensaio (A, B e C) para avaliação da velocidade de propagação das ondas longitudinais, fornecendo-nos indicação se o interior da madeira se encontra degradado. Realizou-se o ensaio pelo método semi-directo, tendo-se aplicado um transdutor na face inferior e, o outro na face lateral, com 40 cm de afastamento entre eles (ver Figura 7.17). A escolha do método semi-directo, teve a ver com o facto de que na grande maioria das vigas não se conseguia uma face lateral plana que conseguisse que os 2 transdutores se encostassem convenientemente à face da viga, tendo sido mais fácil a disponibilidade de faces planas para apenas um transdutor na face lateral e outro na inferior.

Para se minimizar a falta de aderência dos transdutores à madeira, aplicou-se um gel quer nos transdutores quer na superfície da madeira, reduzindo-se assim possíveis variações nos resultados devido ao facto dos transdutores não se encontrarem convenientemente encostados à superfície a analisar. Efectuaram-se duas leituras por cada ponto, no mínimo, tendo-se repetido as leituras sempre que o valor da velocidade era perfeitamente desenquadrado do valor anterior. Na execução deste ensaio teve-se o cuidado de escolher pontos de aplicação dos transdutores o

mais planos possíveis, tendo-se aumentado a aderência dos transdutores à viga através da aplicação de gel quer nos transdutores, quer na viga. Tentou-se que a força de pressão exercida pelo operador nos transdutores fosse aproximadamente constante, como também se tentou que o operador ficasse imóvel durante a realização do ensaio. Devido ao grau de exigência deste ensaio, que obedece a uma série de preocupações, e também ao facto do operador ter que segurar dois transdutores, foi necessário o recurso a duas pessoas para ser possível a sua realização com a qualidade experimental apropriada.

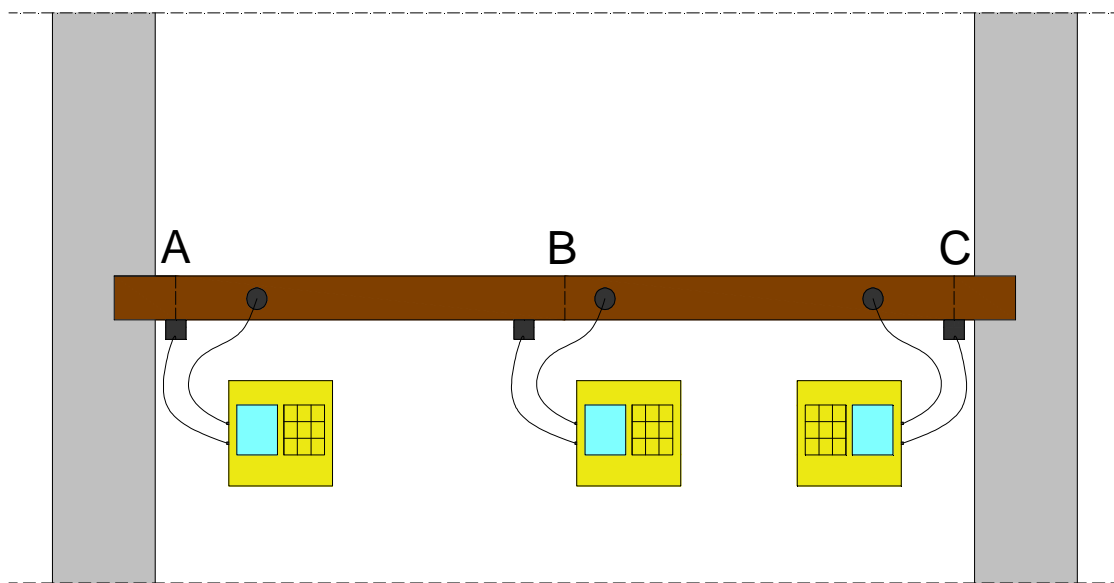


Figura 7.17 - Esquema da aplicação dos ultra-sons.

Procuraram-se defeitos construtivos na área de estudo, bem como nas zonas contíguas, tais como, possíveis infiltrações de água pela cobertura, ausência de caixilharia nos vãos exteriores, zonas de sobrecarga, entre outras.

## 7.6 Estudo Laboratorial

O estudo laboratorial visa complementar o estudo de campo, fornecendo valores comparativos de madeira sã que possam ser utilizados como base de comparação na análise do estado de conservação das vigas inspeccionadas. Apesar da grande variabilidade das propriedades físicas que a madeira apresenta, qualquer indicação que sirva de referência é benéfica para um diagnóstico correcto e completo.

O estudo laboratorial consistiu no ensaio de cinco provetes de madeira de carvalho sem defeitos, de secção equivalente à secção média existente na área de estudo, através da utilização dos mesmos ensaios executados na área de estudo, ultra-sons, Pilodyn e Resistógrafo.

### 7.6.1 Metodologia do Procedimento Laboratorial

É apresentado neste ponto o procedimento experimental efectuado em laboratório, com o objectivo de avaliar as propriedades físicas (dureza superficial, teor em água, densidade) através dos mesmos ensaios utilizados na área de estudo em provetes de carvalho de madeira sã e relativamente seca.

#### 7.6.1.1 Selecção dos Provetes a Ensaiar

Tendo como objectivo o ensaio de provetes que se aproximassem da madeira existente na área de estudo, obtiveram-se cinco provetes de madeira de carvalho, com 50 cm de comprimento cada um e com 16 x 17 cm<sup>2</sup> de secção (ver Figura 7.18). Os provetes foram seleccionados de forma a encontrarem-se sãos e livres de defeitos significativos e com teores em água inferiores a 20 %.



Figura 7.18 - Provetes de carvalho ensaiados em laboratório (Laboratório de Materiais de Construção da Universidade do Minho).

#### 7.6.1.2 Equipamentos Utilizados

Tendo como objectivo conseguir-se uma caracterização semelhante à efectuada no estudo de campo, utilizaram-se os mesmos equipamentos. A Tabela 7.3 sumariza os equipamentos utilizados no procedimento experimental em laboratório.



Tabela 7.3 - Equipamentos Utilizados no Procedimento Experimental Laboratorial.

Capacete de protecção	Fita métrica de metal	Pilodyn (6J)
Óculos de protecção	Máquina fotográfica	Resistógrafo 3450-S
Luvas de protecção	Higrómetro	Ultra-sons

#### 7.6.1.3 Procedimento Experimental

Em primeiro lugar, numeraram-se todos os provetes, de forma bem legível de P1 até P5, proporcionando uma distinção entre os provetes.

De seguida, procedeu-se à caracterização física de todos os provetes, registando-se fotograficamente todas as faces (ver Figura 7.19), ao mesmo tempo que se anotaram as dimensões dos provetes, com o auxílio de uma fita métrica, observando-se a inclinação do fio e procurando-se pela existência de defeitos (nós, fissuras, descaio) e a sua caracterização.

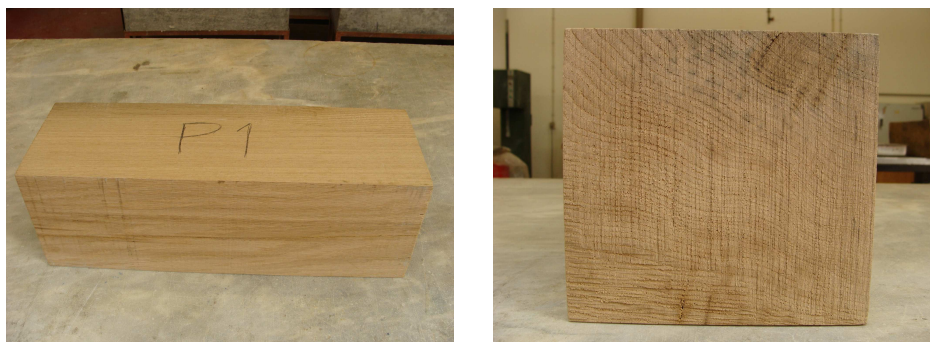


Figura 7.19 - Registo fotográfico de algumas faces do provete P1.

Definiram-se três pontos de ensaio em todos os provetes, nos quais seriam utilizados os ensaios não destrutivos. Marcaram-se dois pontos, um em cada extremidade, designando-se por ponto A e ponto C, com um afastamento de 10 cm em relação ao topo do provete e um ponto a meio vão designado por ponto B. Na Figura 7.20 é possível observarem-se os alinhamentos dos pontos de ensaio.

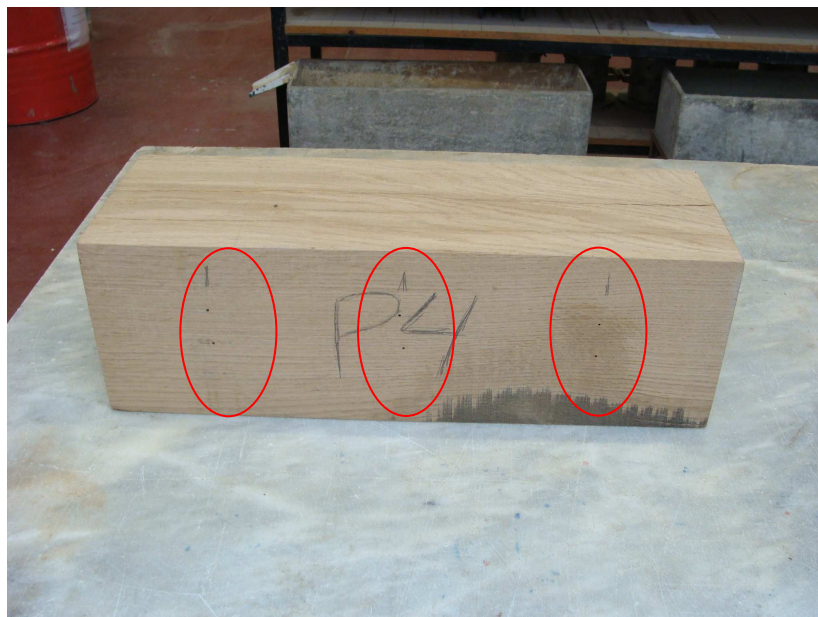


Figura 7.20 - Marcação dos pontos de ensaio.

Posto isto, procedeu-se à determinação do teor em água nos pontos de ensaio, recorrendo-se à utilização do mesmo higrómetro utilizado no estudo de campo. O higrómetro foi aplicado numa das faces longitudinais dos provetes simulando desta forma o método de aplicação no estudo de campo (Figura 7.21).



Figura 7.21 - Aplicação do higrómetro num provete de ensaio.

De seguida, determinou-se a dureza superficial das vigas de madeira nos pontos de ensaio através da utilização do Pilodyn. O equipamento foi aplicado numa das faces longitudinais dos provetes, tal como foi aplicado no estudo *in situ*, tendo-se realizado três leituras para cada ponto.

O próximo passo foi a utilização do resistógrafo nos pontos de ensaio para uma avaliação da



qualidade da madeira ao longo da altura da secção. O equipamento foi aplicado numa das faces longitudinais dos provetes, tal como foi executado no estudo de campo. Na execução do ensaio garantiu-se a verticalidade do equipamento, e escolheram-se os locais de penetração que não possuíssem nós à superfície nem fendas, para evitar a alteração da trajectória da agulha ao longo da penetração.

Por fim, executou-se o ensaio ultra-sónico a meio do provete para se avaliar a velocidade de propagação das ondas longitudinais, fornecendo um valor de referência para a madeira sã. Realizou-se o ensaio pelo método semi-directo, tal como no estudo de campo, tendo-se aplicado um transdutor numa das faces longitudinais e o outro na outra face longitudinal, com 30 cm de afastamento entre eles, realizando-se 3 leituras por cada provete.

## 7.7 Apresentação e Análise dos Resultados

### 7.7.1 Apresentação dos Resultados do Estudo Laboratorial

A observação visual determinou que os provetes apresentavam o fio ligeiramente inclinado e que quase todos eles possuíam pequenas fendas de secagem, facto que se considera desprezável face à pequena largura de fenda apresentada (1 mm). Posto isto, considera-se que a observação visual não encontrou quaisquer defeitos que pudessem por em causa a qualidade e o bom estado da madeira, verificando-se que a mesma se encontrava apropriada para servir como provetes de referência. Apresentam-se em seguida as Tabelas 7.4 a 7.6, com o resumo dos resultados dos ensaios do procedimento laboratorial.

Tabela 7.4 - Resultados do Teor em Água dos Provetes.

Designação do Elemento	Comprimento da peça (cm)	Área da Secção (cm²)	Teor em Água (%)			
			Média Ponto A	Média Ponto B	Média Ponto C	Valor Médio
P1	50,00	272,00	18,50	21,20	21,40	20,37
P2	50,00	272,00	22,00	21,60	21,40	21,67
P3	50,00	272,00	20,70	18,00	18,00	18,90
P4	50,00	272,00	16,80	16,50	17,10	16,80
P5	50,00	272,00	16,70	16,50	17,10	50,30

Tabela 7.5 - Resultados do Pilodyn e dos Ultra-sons dos Provetes

Designação do Elemento	Pilodyn (mm)				Ultra-sons (m/s)			
	Média Ponto A	Média Ponto B	Média Ponto C	Valor Médio	Média Ponto A	Média Ponto B	Média Ponto C	Valor Médio
P1	8	7	7	7	4190,00	4190,00	4190,00	4190,00
P2	6	7	7	7	3300,00	3290,00	3290,00	3293,33
P3	7	8	6	7	3190,00	3190,00	3190,00	3190,00
P4	8	9	9	9	3650,00	3650,00	3650,00	3650,00
P5	8	8	8	8	3790,00	3790,00	3790,00	3790,00

Tabela 7.6 - Resultados da Área Total e no Intervalo de [20;140] do Perfil Resistográfico dos Provetes

Designação do Elemento	Área Total do Perfil Resistográfico (mmbits)				Área do Perfil Resistográfico [20;140] (mmbits)			
	Média Ponto A	Média Ponto B	Média Ponto C	Valor Médio	Média Ponto A	Média Ponto B	Média Ponto C	Valor Médio
P1	65980,28	65879,64	61819,09	64559,67	41502,17	42094,93	41958,09	41851,73
P2	46973,44	51182,39	52872,98	50342,94	39158,38	43556,18	37002,28	39905,61
P3	60060,16	56235,87	55605,46	57300,5	41293,47	38015,58	38115,26	39141,44
P4	63385,28	65024,39	66614,27	65007,98	42630,23	43591,27	43779,04	43333,51
P5	66463,86	70889,84	64758,88	67370,86	42562,57	47737,28	41544,45	43948,1

Na Figura 7.22 observa-se a da média dos perfis resistográficos dos provetes, relacionando a resistência oferecida pela madeira à penetração da agulha do resistógrafo medida em bits ao longo da profundidade perfurada dos provetes, neste caso, corresponde à altura dos mesmos.

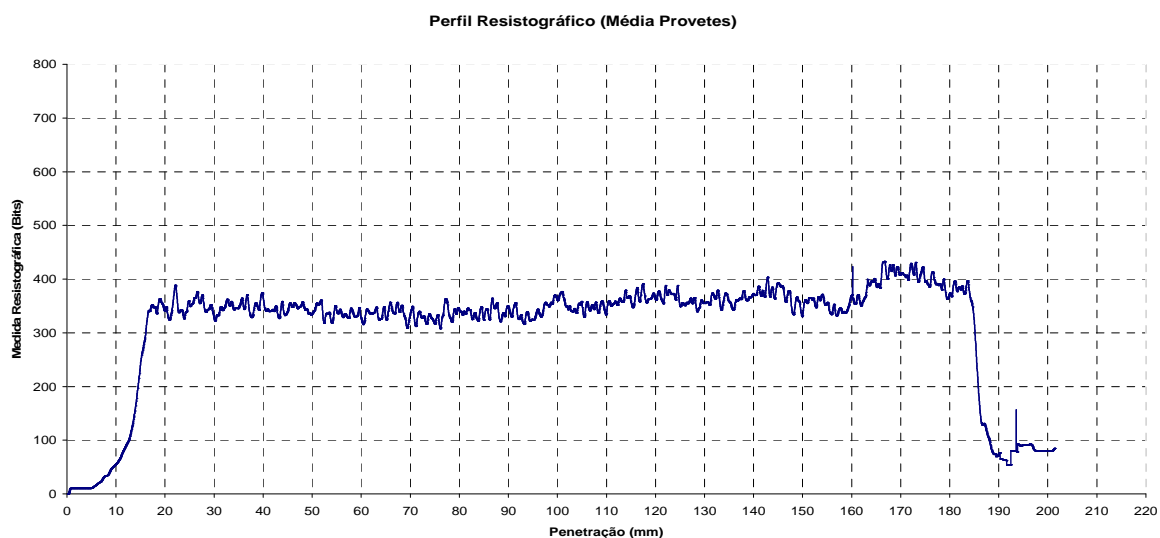


Figura 7.22 - Perfil Resistográfico correspondente à média dos provetes.

No Anexo B poderão ser consultados os gráficos que ilustram as relações entre os diversos ensaios.

### **7.7.2 Apresentação e Análise dos Resultados das Vigas Inspeccionadas**

#### **7.7.2.1 Apresentação e Análise dos Resultados da Inspeção Visual e dos Ensaios Executados**

As Tabelas 7.7 e 7.8, apresentam os resultados da inspeção visual, com a descrição de toda a informação mais relevante.

Tabela 7.7 - Resumo dos Resultados da Inspeção Visual - Parte 1

Designação	Vestígios de insectos	Manchas de humidade	Estado e ventilação dos apoios	Defeitos físicos
V1	Não	Algumas manchas junto ao ponto A	Apoios em bom estado e bem ventilados	Fenda longitudinal com 5 mm de largura e 0,75 m de comprimento
V2	Não	Pequenas manchas de humidade a meio vão	Apoio A um pouco degradado, apoio C em bom estado; apoios em bem ventilados	Não existem
V3	Não	Pequenas manchas de humidade junto ao ponto A	Apoios em bom estado; apoio A mal ventilado, apoio C bem ventilado	Alguns nós de média dimensão; fendas longitudinais com 0,5 m de comprimento e 5 mm de largura
V4	Não	Não	Apoio A no interior do frechal com aspecto duvidoso; apoio C apresenta secção reduzida; apoio A mal ventilado e, o C, bem ventilado	Alguns nós de pequena dimensão; fenda longitudinal com 1,40 m de comprimento, 15 mm de largura e 50 mm de
V5	Não	Mancha junto ao ponto A	Apoios em bom estado e bem ventilados	Alguns nós de média dimensão; fenda longitudinal com 1,20 m de comprimento e 20 mm de largura
V6	Não	Não	Apoios em bom estado; apoio A mal ventilado e apoio C bem ventilado	Existência de um buraco junto ao apoio A, 12 x 8 cm de secção; fenda longitudinal com 1,70 m de comprimento e 20 mm de
V7	Não	Não	Apoios em bom estado e bem ventilados	Alguns nós de média dimensão
V8	Não	Não	Apoios em bom estado e bem ventilados	Alguns nós de pequena dimensão
V9	Não	Não	Apoio A muito degradado, apoio C em bom estado; apoio A bem ventilado, apoio C mal ventilado	Alguns nós de pequena dimensão; existência de um buraco de média dimensão
V10	Não	Não	Apoio A um pouco degradado, apoio C em bom estado; apoios bem ventilados	Pequena fenda longitudinal na face inferior; pequenos nós
V13	Não	Algumas manchas de humidade a meio vão	Apoio A um pouco degradado, apoio C em bom estado; apoios bem ventilados	Fenda longitudinal na face inferior com 1,30 m de largura, 15 mm de largura e 20 mm de profundidade
V21	Não	Não	Apoios em bom estado e bem ventilados; o apoio C aparentemente apresenta uma secção reduzida na entreeca na parede	Pequenas fendas com 1 mm de largura
V22	Não	Não	Apoios em bom estado e bem ventilados	Não existem
V24	Não	Não	Apoios em bom estado; apoio A mal ventilado, apoio C bem ventilado	Existência de muitos nós
V25	Não	Grande mancha de humidade no ponto C	Apoio C muito degradado, apresentando uma secção reduzida, apoio C em bom estado; apoios bem ventilados	Pequenos nós
F2	Não	Algumas manchas junto ao ponto A	Apoios em bom estado e mal ventilados	Pequenos nós; fenda longitudinal com 1,30 m, com 10 mm de largura e 30 a 40 mm de profundidade
F3	Não	Algumas manchas de humidade	Apoios em bom estado e mal ventilados	Pequenos nós

Tabela 7.8 - Resumo dos Resultados da Inspeção Visual - Parte 2

Designação	Pancadas com martelo	Penetração do formão	Caruncho (serrim e orifícios)	Fungos (cor, textura e extensão)	Observações
V1	Som forte de madeira sã, com excepção a meio vão tendo um som oco	Boa resistência com excepção da zona a meio vão, que tem uma penetração de 20 mm	Caruncho pequeno a meio vão, com orifícios circulares <1 mm	Possível início da fixação de fungos comprovado pelas lascas enroladas	Viga com partes degradadas a meio vão
V2	Som forte de madeira sã, com excepção a meio vão tendo um som oco	Boa resistência com excepção da zona a meio vão, que tem uma penetração de 10 mm	Caruncho pequeno em toda a viga, com concentração a meio vão, com orifícios circulares <1 mm	Não	Viga com partes degradadas a meio vão
V3	Som forte de madeira sã	Boa resistência	Pequenos focos de caruncho pequeno, com orifícios circulares <1 mm	Não	Viga com pequenas partes degradadas junto às extremidades das faces
V4	Som forte de madeira sã, com excepção a meio vão tendo um som oco	Boa resistência com excepção da zona a meio vão, que tem uma penetração de 30 mm	Pequenos focos de caruncho pequeno, com orifícios circulares <1 mm, sem degradação aparente	Não	Viga com partes degradadas na sua extensão
V5	Som forte de madeira sã	Boa resistência	Pequenos focos de caruncho pequeno nas faces laterais, com orifícios circulares <1 mm, sem degradação aparente	Não	Viga sem qualquer zona degradada
V6	Som forte de madeira sã	Boa resistência	Pequenos focos de caruncho pequeno junto aos apoios, com orifícios circulares <1 mm, sem qualquer degradação	Não	Viga sem qualquer zona degradada
V7	Som forte de madeira sã, com excepção da faixa inferior em toda a extensão das faces laterais	Boa resistência com excepção da faixa inferior em toda a ext. das faces lat., com penetração de 20 mm	Grande quantidade de caruncho em toda a viga, com orifícios circulares > 2 mm; forte ataque junto apoio A	Não	Viga com uma profundidade de degradação de 20 mm nas zonas atacadas pelo caruncho
V8	Som forte de madeira sã	Boa resistência	Caruncho pequeno por toda a viga, com orifícios circulares <1 mm	Não	Viga sem qualquer zona degradada
V9	Som um pouco oco por toda a viga	Fraca resistência, com uma profundidade de 10 mm	Forte ataque de caruncho peq. junto ao apoio A com orifícios circulares > 2 mm, e presença moderada no restante	Não	Viga na presença de ataque activo sendo visível a presença de serrim muito fino de cor castanho claro
V10	Som forte de madeira sã, com excepção da faixa junto às arestas	Boa resistência com excepção da faixa junto às arestas	Grande quant. de caruncho em toda a viga, com orifícios circulares < 1 mm, com predominância na faixa junto às arestas	Não	Viga com degradação visível na faixa junto às arestas
V13	Som forte de madeira sã, com excepção das zonas fortemente carunchadas junto aos apoios	Boa resistência com excepção das zonas fortemente carunchadas junto aos apoios às arestas	Forte ataque de caruncho peq. junto aos apoios e a meio vão, com orifícios circulares > 2 mm	Não	Viga com degradação acentuada nas zonas carunchadas, com uma profundidade de 30 mm
V21	Som forte de madeira sã	Boa resistência	Caruncho pequeno em toda a viga, com concentração a meio vão, com orifícios circulares <1 mm	Não	Viga sem qualquer zona degradada
V22	Som forte de madeira sã	Boa resistência	Pequenos focos de caruncho pequeno junto aos apoios, com orifícios circulares <1 mm, com 20 a 30 mm de profundidade de ataque	Não	Viga quase sem zonas degradadas
V24	Som forte de madeira sã	Boa resistência	Pequenos focos de caruncho pequeno junto aos apoios, com orifícios circulares <1 mm, com 20 mm de profundidade de ataque	Não	Viga quase sem zonas degradadas
V25	Som um pouco oco por toda a viga, e com vibração no apoio C	Fraca resistência, com uma profundidade de 50 mm	Forte ataque de caruncho pequeno em toda a viga, com orifícios circulares < 1 mm	Existência de fungos de podridão castanha, com 0,5 m de extensão	Viga muito degradada por caruncho e com um forte desenvolvimento de fungos
F2	Som forte de madeira sã	Boa resistência	Caruncho pequeno com concentração junto ao apoio C, com orifícios circulares <1 mm, e 20 mm de profundidade de ataque	Não	Viga com pouca degradação visível
F3	Som forte de madeira sã, com excepção das zonas fortemente atacadas	Boa resistência com excepção das zonas fortemente carunchadas	Forte ataque de caruncho peq. junto aos apoios e a meio vão, com orifícios circulares < 1 mm	Não	Viga bastante deteriorada devido ao caruncho, atingindo 60 mm de profundidade de ataque

Nas Tabelas seguintes (Tabelas 7.9 a 7.11) apresentam-se os resultados obtidos pelos ensaios, segundo a metodologia descrita. A análise apresentada refere-se aos resultados dos ensaios nos três pontos distintos em que as vigas foram avaliadas.

Os resultados apresentados, referentes ao Pilodyn e aos ultra-sons, correspondem a uma média de pelo menos duas leituras efectuadas no mesmo ponto, enquanto que o teor em água e as áreas do perfil resistográfico correspondem apenas a uma leitura.

A coluna correspondente à área total do perfil resistográfico corresponde ao cálculo do integral de área de todo o gráfico em na altura da secção perfurada, de acordo com a seguinte expressão:

$$\int_0^h \textit{Perfil resistográfico total} \quad (7.1)$$

em que,

$h$  : profundidade total de penetração da agulha do resistógrafo (mm).

A coluna correspondente à área do perfil resistográfico no intervalo de 20 a 140 mm, corresponde ao cálculo do integral de área do perfil entre os 20 e os 140 mm, de acordo com a seguinte expressão:

$$\int_{20}^{140} \textit{Área perfil resistográfico} \quad (7.2)$$

em que,

20 e 140 : profundidades de penetração da agulha do resistógrafo(mm).

A escolha deste intervalo foi efectuada tendo em consideração uma análise de todos os perfis resistográficos obtidos, em que se constatou diferentes profundidades de penetração da agulha, e caso se comparasse apenas as áreas totais dos perfis do resistógrafo estaríamos a cometer um erro face à não equivalência das profundidades. Posto isto, considerou-se necessário estabelecer um intervalo de profundidades que fosse comum a todas as vigas, simulando-se a mesma profundidade de penetração para todas elas, criando um critério padrão capaz de estabelecer uma comparação fidedigna. Após a análise da profundidade total de todas as vigas verificou-se que as vigas teriam pelo menos 150 mm de profundidade de penetração, e

considerando a parte final do perfil resistográfico como residual devido à redução do atrito junto à superfície do elemento, optou-se pela profundidade de 140 mm como o limite máximo do intervalo. Relativamente ao limite inferior do intervalo, optou-se pelos 20 mm de profundidade devido a considerar-se que a parte inicial do perfil resistográfico é desprezável, devido ao atrito no início da perfuração.

Tabela 7.9 - Resumo dos resultados obtidos pelos ensaios no Ponto A

Designação do Elemento	Área Secção Média (cm <sup>2</sup> )	Teor em Água (%)	Média Pilodyn(mm)	Média Ultra-sons (m/s)	Área Perfil Resistográfico total (mmbits)	Área Perfil Resistográfico [20;140] (mmbits)
V1	234,00	21,5	6	1525	91152,87	71498,54
V2	342,00	18,8	6	2375	95469,04	67220,14
V3	216,00	18,4	6	905	83090,28	58405,94
V4	272,00	11,4	5	2070	85780,42	64278,47
V5	270,00	20,0	7	555	88035,04	54155,82
V6	360,75	20,2	9	1525	112939,45	67827,22
V7	260,00	19,5	10	2390	69355,51	41418,09
V8	112,00	18,7	7	2245	56292,78	46004,25
V9	176,00	17,1	21	815	38186,20	33425,95
V10	374,00	16,9	8	2025	53623,33	36597,57
V13	378,00	19,0	5	1430	61487,48	38237,96
V21	360,00	19,8	7	1060	61268,90	47237,96
V22	221,00	20,6	4	2060	138747,76	87211,95
V24	342,00	19,8	6	720	135488,36	75753,20
V25	260,00	20,9	8	1660	88633,79	48513,78
F2	272,00	20,1	6	2690	91482,03	67578,13
F3	256,00	26,2	8	1270	0,00	0,00

Tabela 7.10 - Resumo dos resultados obtidos pelos ensaios no Ponto B.

Designação do Elemento	Área Secção Média (cm <sup>2</sup> )	Teor em Água (%)	Média Pilodyn(mm)	Média Ultra-sons (m/s)	Área Perfil Resistográfico total (mmbits)	Área Perfil Resistográfico [20;140] (mmbits)
V1	234,00	21,5	6	1525	91152,87	71498,54
V2	342,00	18,8	6	2375	95469,04	67220,14
V3	216,00	18,4	6	905	83090,28	58405,94
V4	272,00	11,4	5	2070	85780,42	64278,47
V5	270,00	20,0	7	555	88035,04	54155,82
V6	360,75	20,2	9	1525	112939,45	67827,22
V7	260,00	19,5	10	2390	69355,51	41418,09
V8	112,00	18,7	7	2245	56292,78	46004,25
V9	176,00	17,1	21	815	38186,20	33425,95
V10	374,00	16,9	8	2025	53623,33	36597,57

V13	378,00	19,0	5	1430	61487,48	38237,96
V21	360,00	19,8	7	1060	61268,90	47237,96
V22	221,00	20,6	4	2060	138747,76	87211,95
V24	342,00	19,8	6	720	135488,36	75753,20
V25	260,00	20,9	8	1660	88633,79	48513,78
F2	272,00	20,1	6	2690	91482,03	67578,13
F3	256,00	26,2	8	1270	0,00	0,00

Tabela 7.11 - Resumo dos resultados obtidos pelos ensaios no Ponto C.

Designação do Elemento	Área Secção Média (cm²)	Teor em Água (%)	Média Pilodyn(mm)	Média Ultra-sons (m/s)	Área Perfil Resistográfico total (mmbits)	Área Perfil Resistográfico [20;140] (mmbits)
V1	234,00	18,0	5	585	80487,54	55032,60
V2	342,00	16,8	7	470	70341,46	50630,77
V3	216,00	17,4	6	1190	87495,71	51810,61
V4	272,00	17,1	11	510	61617,62	38226,54
V5	270,00	17,6	5	1330	106544,55	80187,18
V6	360,75	17,2	6	545	85085,55	61365,26
V7	260,00	14,9	9	1515	76963,77	41334,49
V8	112,00	14,3	7	1020	49435,80	37713,58
V9	176,00	17,3	15	1730	55020,66	37868,69
V10	374,00	15,2	9	2855	70704,86	47974,20
V13	378,00	19,5	8	910	98219,27	77517,46
V21	360,00	19,4	5	230	119915,43	89639,12
V22	221,00	16,4	4	530	138747,76	87211,95
V24	342,00	17,1	4	3245	79606,38	54130,19
V25	260,00	19,1	4	2250	122053,01	72627,68
F2	272,00	19,6	6	2030	60787,79	42233,02
F3	256,00	19,1	4	465	125446,71	69963,20

No Anexo C apresentam-se os perfis resistográficos de todos os pontos de ensaio de todas as vigas inspeccionadas.

Analisando-se os resultados das Tabelas 7.9 a 7.11, seleccionaram-se os resultados para cada um dos ensaios referentes ao maior e menor valor das vigas analisadas, e o calcularam-se as médias dos diversos ensaios para os três pontos analisados. Na Tabela 7.12, apresentam-se esses resultados, tal como o valor médio dos resultados obtidos com os provetes no estudo laboratorial.



Tabela 7.12 - Limites Superior e Inferior dos Resultados Obtidos das Vigas Inspeccionadas.

Resultados	Pilodyn (mm)	Teor em água (%)	Área Perfil Resistográfico[20;140] (mmbits)	Ultra-sons (m/s)
Maior valor de todas as vigas analisadas	21	26,2	105743,76	3245
Menor valor de todas as vigas analisadas	3	11,4	33145,20	230
Valor médio das vigas analisadas	7	18,2	56854,30	1197
Valor médio dos provetes ( $Um_{provetes}$ )	7	18,9	41636,08	3623

A Tabela 7.12 permite uma leitura simples e directa, sendo que quanto maior for a penetração do Pilodyn mais deteriorada se encontra a madeira. Da mesma forma, quanto maior for o teor em água maior é a probabilidade da madeira se encontrar degradada ou de poder vir a ser degradada pelos agentes biológicos. Quanto maior for a velocidade das ondas longitudinais obtidas pelo método ultra-sónico maior é a resistência da madeira, significando maior densidade logo madeira sã. Por fim quanto maior for a área do perfil resistográfico no intervalo de 20 a 140 mm, melhor é a resistência da madeira à perfuração pela agulha do resistógrafo, logo traduz a existência de madeira de maior densidade.

Pela observação da Tabela 7.12, para o caso do ensaio do Pilodyn, verifica-se para as vigas analisadas a existência de um ponto de ensaio que possui fraca dureza superficial, Pilodyn penetra 21 mm. Este resultado revela que a viga neste ponto se encontra bastante deteriorada possivelmente pela acção do caruncho pequeno, principal agente de degradação existente nas vigas inspeccionadas. Para o resultado oposto, 3 mm de penetração, verifica-se que este corresponde a um valor abaixo da média obtida, 7 mm, o que poderá indicar que a viga naquele ponto de ensaio possui uma dureza superficial elevada, não servindo como base de comparação para o universo de estudo. Efectuando-se uma análise comparativa com o resultado médio da penetração com pilodyn obtido para os provetes, 7 mm, constata-se que o valor é igual ao valor médio das vigas inspeccionadas, servindo assim este valor como um valor de referência para uma dureza superficial da madeira correspondente a madeira sã. Sendo 7 mm, um valor correspondente a madeira sã, então valor de 3 mm corresponde a um valor de madeira de elevada dureza superficial.

Deve ser referido que os provetes possuem uma idade muito inferior à das vigas inspeccionadas, são oriundos de um local diferente e, o simples facto de serem de espécimes diferentes por si só já acarreta bastante variabilidade. O que significa, que os valores obtidos com os provetes não devem ser tidos como valores absolutos de referência mas sim como valores indicativos, que em conjunto com os próprios resultados e valores médios das vigas ajudam a concluir-se acerca do estado de conservação da madeira.

Relativamente à análise do teor em água das vigas inspeccionadas, verifica-se que o valor médio se situa acima dos 18 %, o que favorece o aparecimento de caruncho e de fungos. Apesar dos fungos terem preferência por teores em água mais próximos do ponto de saturação das fibras, para teores em água acima dos 20 %, a probabilidade destes se desenvolverem começa a ser mais elevada.

A análise dos resultados do método ultra-sónico, demonstra que o valor médio das vigas inspeccionadas, 1197 m / s, é aproximadamente um terço do valor médio dos provetes, 3623 m / s. Esta diferença poderá estar relacionada com a antiguidade das vigas, havendo alterações na sua densidade mas de qualquer forma o valor dos provetes é um bom valor orientativo, face à existência de vigas inspeccionadas que se encontram em muito bom estado e que possuem resultados próximos dos valores dos provetes.

Os resultados obtidos com o Resistógrafo, nomeadamente a área extraída do perfil resistográfico no intervalo de 20 a 140 mm, indicam que os provetes possuem menor área média de perfil resistográfico do que as vigas inspeccionadas. O perfil resistográfico médio dos provetes traduz uma resistência oferecida pela madeira à penetração da agulha do Resistógrafo inferior a 400 bits, valor inferior à resistência média oferecida pelas vigas inspeccionadas que se aproxima dos 600 bits. Perante o ensaio resistográfico a madeira antiga encontra-se em melhor estado do que os provetes ensaiados. De qualquer forma, o ensaio laboratorial permitiu estabelecer um limite a partir do qual poderíamos estar na presença de madeira deteriorada, isto é, qualquer resultado abaixo da média da área do perfil resistográfico no intervalo de 20 a 140 mm para os provetes, poderá indicar que a madeira se encontra num estado duvidoso, tendo que ser confirmado por outros métodos complementares.

Se considerarmos os valores médios dos ensaios das vigas inspeccionadas podemos verificar que em comparação com os valores médios dos provetes, os resultados para o Pilodyn são totalmente coincidentes, em relação ao ensaio do Resitógrafo os resultados são superiores nas vigas inspeccionadas servindo os resultados dos provetes como valores mais conservativos, e os resultados do método ultra-sónico são inferiores aos dos provetes, servindo os valores dos provetes como uma referência mais conservativa.

Com base nos resultados obtidos e tendo em conta os valores médios dos provetes referidos na Tabela 7.12, apresenta-se em seguida a Tabela 7.13 que caracteriza a quantidade de vigas inspeccionadas em relação aos resultados obtidos em comparação com os valores médios dos provetes.

Tabela 7.13 - Distribuição das Vigas Inspeccionadas em Relação aos Valores Médios dos Provetes.

Ensaio	Vigas Inspeccionadas > Valor Médio Provetes	Vigas Inspeccionadas = Valor Médio Provetes	Vigas Inspeccionadas < Valor Médio Provetes
Pilodyn	35,59 %	17,33 %	50,98 %
Área Perfil Resistográfico[20;140]	74,51 %	-	25,49 %

Da Tabela 7.13 conclui-se que metade das vigas analisadas possuem uma dureza superficial inferior à média dos provetes, e 74,51 % das vigas inspeccionadas possuem um perfil resistográfico superior ao perfil resistográfico médio obtido para os provetes.

O teor de água não aparece no quadro anterior pois não faria sentido comparar o teor em água das vigas inspeccionadas com o teor em água dos provetes, sendo assim convencionou-se o valor de 18 % como valor de referência para o teor em água em relação a uma análise percentual, concluindo-se que 47 % das vigas inspeccionadas possuem o teor em água superior a 18 %, enquanto que 53 % possuem o teor em água inferior a 18 %.

Para melhor se explicar a distribuição dos resultados das vigas inspeccionadas relativamente ao método ultra-sónico, optou-se por fragmentar em diversas percentagens do valor médio dos provetes, (25 %, 50 % e 75 %), ver Tabela 7.14, visto a totalidades das vigas apresentarem valores abaixo da média dos provetes.

Tabela 7.14 - Relação Entre a Percentagem de Vigas Inspeccionadas que Atingem uma Percentagem do valor Médio dos Ultra-sons dos Provetes.

% Valor Médio dos Ultra-sons Provetes	Vigas Inspeccionadas
$< 25 \% U_{m_{provetes}}$	47,26 %
$25 \% U_{m_{provetes}}$	31,37 %
$50 \% U_{m_{provetes}}$	17,65 %
$75 \% U_{m_{provetes}}$	3,92 %

Como se verifica pela observação do Tabela 7.14, quase metade das vigas inspeccionadas não conseguem atingir 25 % da velocidade média de propagação das ondas longitudinais pelo método ultra-sónico, para os provetes, não conseguindo atingir 905 m / s. Da metade restante a maioria possui resultados entre 25 % e 50 %,do valor médio dos ultra-sons dos provetes, correspondendo assim a um intervalo de valores entre 905 m/s e 1811 m/s.

Em seguida a título exemplificativo, apresentam-se as Figura 7.23 e 7.24 que ilustram a dispersão de resultados ao relacionar-se os resultados do ensaio dos ultra-sons com os do Pilodyn e, entre o ensaio do Pilodyn com o teor em água.

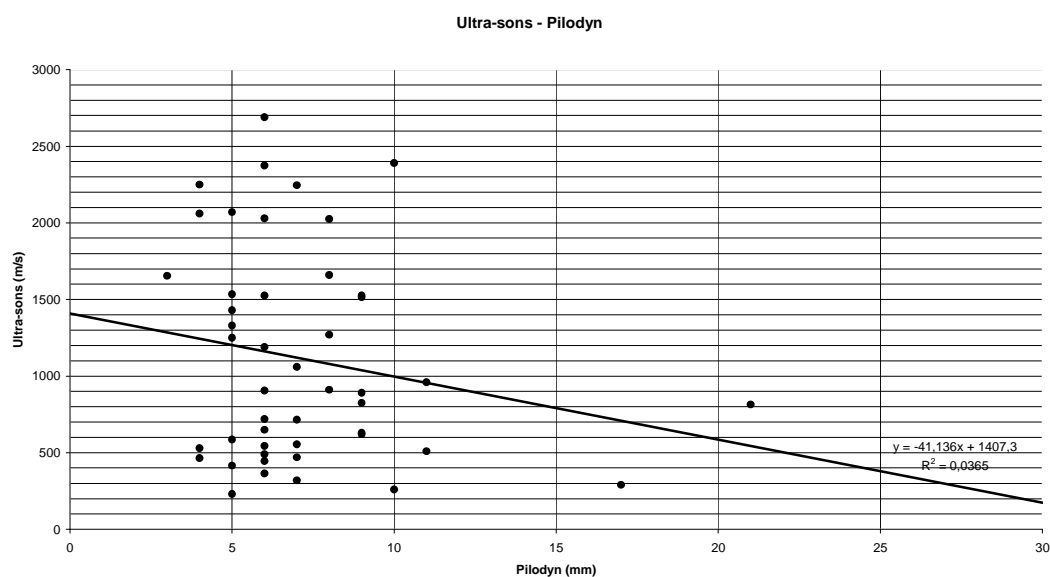


Figura 7.23 - Ultra-sons Versus Pilodyn (vigas inspeccionadas).

Observando-se a Figura 7.23 (Ultra-sons Versus Pilodyn), verifica-se que não existe qualquer correlação entre os dois métodos de ensaio ( $R^2=0,0365$ ), apesar da eliminação dos pontos que poderiam corresponder a erros de operação (outpoints) devido à disparidade que apresentavam. A dispersão de resultados é grande, não se conseguindo traduzir graficamente a lógica natural de que, quanto maior for a profundidade de penetração do Pilodyn menor será a velocidade das ondas obtidas pelo método ultra-sónico. No procedimento laboratorial também se obtiveram resultados semelhantes para os provetes, ver Anexo B, em que a relação dos resultados não traduz a tendência natural ( $R^2=0,478$ ). Este facto poderá ser explicado com a diferença da profundidade da madeira a ser analisada, enquanto que o Pilodyn avalia a camada superficial da madeira, os ultra-sons avaliam o seu interior, o que poderá conduzir a situações totalmente opostas, dureza superficial boa (baixa penetração do pilodyn) e interior degradado (baixa velocidade das ondas longitudinais).

Na Figura 7.24 apresenta-se a relação entre o ensaio do Pilodyn e o teor em água para as vigas em estudo.

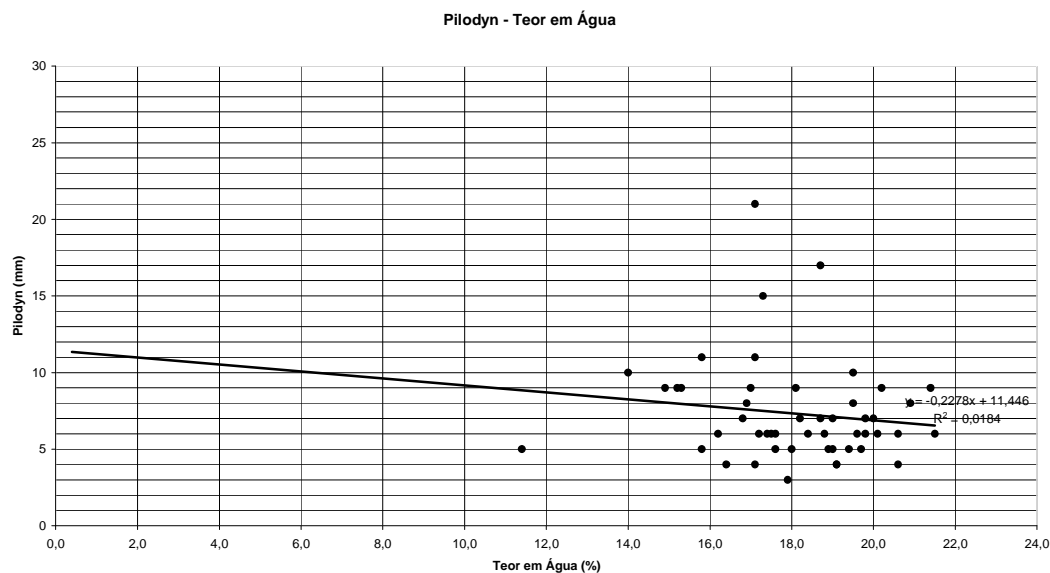


Figura 7.24 - Pilodyn Versus teor em água (vigas inspeccionadas).

A observação da Figura 7.24 (Pilodyn Versus Teor em Água), permite concluir que não existe qualquer correlação entre os resultados ( $R^2=0,0184$ ), verificando-se diferentes profundidades de penetração com o pilodyn para teores em água muito próximos. As vigas poderiam ter sofrido um aumento do teor em água muito recentemente o que proporcionou que não se

desenvolvessem ataques muito gravosos à sua superfície, originando penetrações pouco profundas com o pilodyn. O estudo laboratorial dos provetes demonstra uma relação entre a profundidade de penetração com o pilodyn e o teor em água que não corresponde ao esperado, o estudo laboratorial apesar de os resultados estarem mais perto de uma correlação ( $R^2=0,786$ ) (ver Anexo B), essa relação não traduz o que era espectável tal como o sucedido no estudo de campo.

#### 7.7.2.2 Análise dos Pontos de Ensaio das Vigas Inspeccionadas

Numa perspectiva de se perceber o comportamento das vigas na área de estudo, caracterizando-se os pontos das vigas mais susceptíveis de degradação, procedeu-se à análise dos resultados dos diversos ensaios em cada um dos pontos de ensaio, verificando-se quais os pontos mais problemáticos.

Relativamente ao ensaio do Pilodyn, o ponto das vigas com maior penetração em profundidade em relação ao valor médio dos provetes é o ponto B, correspondente à zona a meio vão. Esta zona poderá estar mais degradada devido a uma maior exposição a humidades de infiltração oriundas do piso superior.

O teor em água das vigas inspeccionadas é claramente superior no ponto A, em que 76,47 % das vigas possuem valores acima dos 18 %, este facto deverá estar relacionado com a grande proximidade ao exterior, visto o ponto A ser um ponto junto à entrega das vigas na parede exterior em alvenaria de granito. Ao estarmos numa zona junto a uma parede exterior significa que a probabilidade de existirem infiltrações de água é bastante elevada.

Analisando-se os perfis resistográficos de todas as vigas inspeccionadas, o ponto A apresenta o maior número de perfis resistográficos com menor área, relativamente ao intervalo de 20 a 140 mm de profundidade. Estes resultados possivelmente poderão ser relacionados com o facto de também ser este ponto que apresenta sempre maiores teores em água, sendo certo que existe uma predominância de ataques biológicos nas zonas de maior humidade.

Face aos resultados obtidos pelo método ultra-sónico para as vigas inspeccionadas, o ponto B é o ponto que apresenta o maior número de vigas com velocidades de propagação de ondas

inferior a 25 % do valor médio do ensaio ultra-sónico para os provetes. Tal como para o pilodyn, esta zona poderá estar mais degradada devido a uma maior exposição a humidades de infiltração oriundas do piso superior, ou devido a maiores irregularidades no interior das vigas neste ponto, como fissuras, pontos ocos, entre outros.

No Anexo D apresentam-se as diversas correlações para os ensaios realizados.

### 7.7.2.3 Avaliação do Estado de Conservação das Vigas

Após a interpretação de todos os resultados apresentados, e relacionando-se a informação obtida da inspeção visual com os resultados dos ensaios, conseguiu-se determinar o presumível estado de conservação das vigas inspeccionadas (ver Tabela 7.15). Nas situações de dúvida adoptou-se uma postura conservativa favorecendo a segurança da estrutura, optando-se assim pela substituição das vigas em causa.

Tabela 7.15 - Estado de Conservação das Vigas Inspeccionadas.

Designação	Relação entre a inspeção visual e os ensaios	Viga a substituir parcialmente	Viga a substituir na totalidade	Viga a manter	Estado de Conservação da Viga
V1	Em concordância na zona B, à excepção dos ultra-sons em C	X			Em estado razoável com excepção da zona B que deverá ser reforçada ou substituída; deverá ser corrigido o teor em água na zona A
V2	Em concordância na zona A, à excepção dos ultra-sons em B e C			X	Em bom estado, apesar do ponto C apresentar algumas zonas degradadas entre os 35 e os 80 mm, e 15,60 e 17 mm de profundidade.
V3	Em concordância à excepção dos ultra-sons em A e B			X	Em bom estado, sem qualquer zona degradada
V4	Em concordância, à excepção dos ultra-sons em C	X			Em estado razoável com excepção da zona C que deverá ser reforçada ou substituída
V5	Em concordância à excepção dos ultra-sons em C			X	Em bom estado apesar de apresentar a zona do ponto A um pouco degradada; deverá ser corrigido o teor em água na zona A
V6	Em concordância, com excepção da inspeção visual em C	X			Em estado razoável com excepção da zona C que deverá ser reforçada ou substituída; deverá ser corrigido o teor em água na zona A
V7	Em discordância		X		Em mau estado, apesar de se poder reforçar, achou-se prudente a substituição total da viga
V8	Em discordância			X	Em bom estado, os resultados numéricos não retratam os bons resultados da inspeção visual
V9	Em concordância	X			Em estado razoável com excepção da zona A que deverá ser reforçada ou substituída

V10	Em concordância	X			Em estado razoável com excepção da zona A que deverá ser reforçada ou substituída
V13	Em discordância	X			Em estado razoável com excepção da zona A que deverá ser reforçada ou substituída; deverá ser corrigido o teor em água na zona A e C
V21	Em concordância, à excepção dos ultrasons em C			X	Em bom estado, sem qualquer zona degradada; deverá ser corrigido o teor em água na zona A, B e C
V22	Em concordância, à excepção dos Ultrasons em C			X	Em bom estado, sem qualquer zona degradada; deverá ser corrigido o teor em água na zona A e B
V24	Em concordância à excepção dos Ultrasons em A			X	Em bom estado, sem qualquer zona degradada; deverá ser corrigido o teor em água na zona A
V25	Em discordância		X		Em mau estado, apresenta desenvolvimento de fungos de podridão; redução da secção devido à degradação
F2	Em concordância			X	Em bom estado, apesar da presença de caruncho; deverá ser corrigido o teor em água na zona A, B e C
F3	Em concordância		X		Em mau estado, apresenta a zona A bastante degradada, bem como fissuração excessiva

#### 7.7.2.4 Avaliação Detalhada de 2 Vigas

O processo de avaliação do estado de conservação das vigas, será demonstrado em 2 exemplos aleatórios, viga V13 e viga V25, apresentando-se uma descrição da informação obtida pela inspecção visual e, a consequente análise dos resultados relacionando a inspecção visual com os resultados dos ensaios para as vigas referidas.

##### 7.7.2.4.1 Viga V13

A inspecção visual da viga V13 permitiu reunir informação sobre o aspecto físico da viga, e o seu estado de conservação. Numa primeira abordagem verificou-se o fio inclinado da madeira, bem como a existência de flecha a meio vão. Não se encontraram nós, nem falhas de secção, nem descaio da madeira.

A simples observação dos apoios permitiu verificar que tanto o apoio A como o C encontram-se bem ventilados, no entanto o apoio A apresenta um aspecto deteriorado, tendo-se confirmado com a pancada do martelo um som oco e, com o formão a penetração de cerca de 3 cm na secção. Apesar do apoio C se encontrar em bom estado, confirmado pelo som forte do martelo e pela não penetração do formão na superfície nesse ponto, a parte da viga junto ao apoio C que



se encontra fora da parede, revela os mesmos sintomas do apoio A. A degradação é resultado da actividade de caruncho pequeno, sendo visíveis orifícios circulares de diâmetros entre 1 - 3 mm. O ataque do caruncho pequeno encontra-se disperso por toda a viga, com grandes concentrações junto aos apoios e a meio vão (ver Fig. 7.25). As zonas que não se encontram carcomidas, apresentam um som forte quando sujeitas à pancada do martelo e possuem uma boa resistência à penetração do formão.



Figura 7.25 - Forte ataque de caruncho localizado a meio vão (viga V13).

Na zona a meio vão até ao apoio C identificou-se uma fenda longitudinal, com 1,30 m de comprimento, 15 mm de largura e 20 mm de profundidade, tal como é possível observar-se na Figura 7.26.



Figura 7.26 - Fenda longitudinal na zona entre o meio vão e o apoio C (viga V13).

Também na zona a meio vão, foi possível verificar a existência de algumas manchas resultantes da secagem de água (ver Figura 7.27), não existindo a formação de qualquer tipo de fungos.

Desta forma consegue-se caracterizar o estado de conservação em que se encontra a viga V13, sendo necessária a utilização complementar com outros ensaios para se verificar qual o estado das vigas em profundidade com maior detalhe.



Figura 7.27 - Manchas de humidade existentes na zona a meio vão (viga V13).

A Figura 7.28 apresenta os perfis resistográficos obtidos nos vários pontos da viga V13 em que foi executado o ensaio do Resistógrafo. Os perfis traduzem a resistência oferecida pela madeira à penetração da agulha do resistógrafo, à medida que a mesma vai avançando em profundidade.

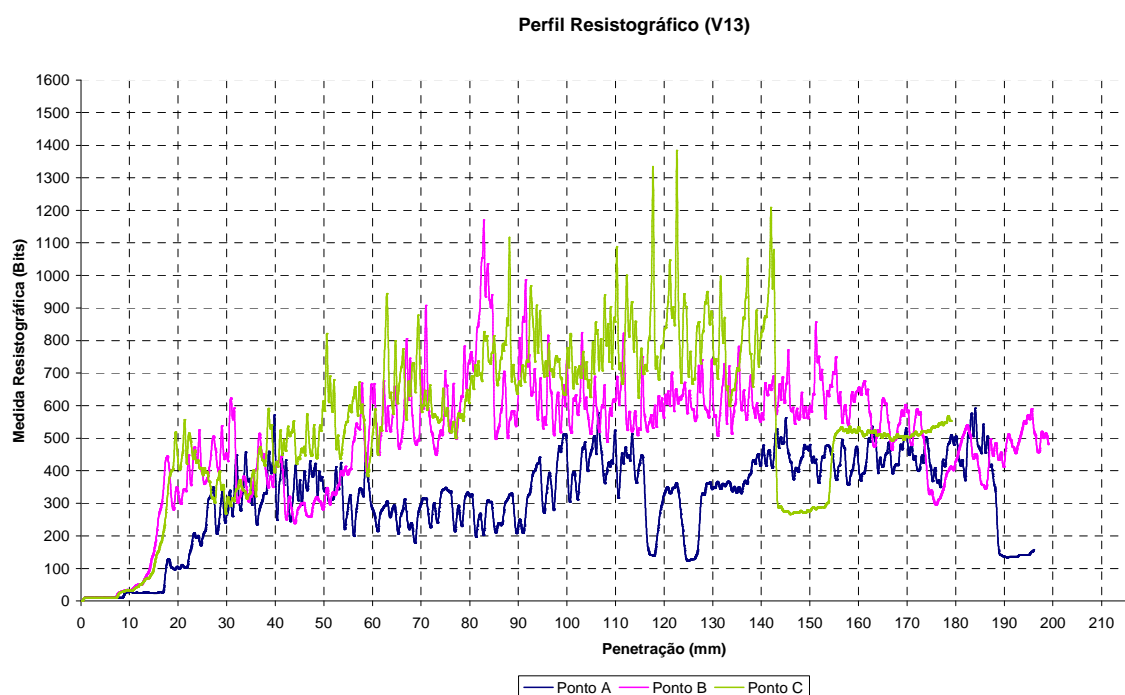


Figura 7.28 - Perfis resistográficos dos pontos A, B e C (viga V13).

O conjunto da descrição da inspecção visual e dos resultados obtidos com os ensaios, proporciona um levantamento do estado de conservação da viga, conseguindo-se informação suficiente para elaborar um diagnóstico mais correcto.

Consultando-se as Tabelas 7.9 a 7.12, constata-se que o teor de humidade na viga V13 apresenta um valor elevado ( $> 18\%$ ) em alguns pontos, podendo aumentar caso não sejam

corrigidos os factores que despoletam o fenómeno (infiltrações de água pela cobertura, caixilharia exterior deteriorada ou de fraca vedação, entre outras).

Pela análise das Tabelas 7.9 a 7.12, o ensaio do Pilodyn no ponto A e B obteve o mesmo resultado (5mm), indicando uma dureza superficial considerável, 40 % abaixo do valor médio obtido para os provetes e das vigas inspeccionadas. O ponto C, relativamente ao mesmo ensaio, apresenta uma dureza superficial inferior (8 mm), 12,5 % abaixo do valor médio dos provetes e das vigas inspeccionadas.

O ensaio ultra-sónico, pela análise das Tabelas 7.9 a 7.12, revelou valores inferiores à média dos provetes nos três pontos de ensaio, em que para o ponto A o resultado é inferior 60,5 %, no ponto B 65,5 % e, no ponto C 74,88 %. Se compararmos os resultados com a média das vigas inspeccionadas verifica-se que os mesmos adquirem um significado mais satisfatório, em que o ponto A está aproximadamente 16 % acima, o ponto B 4 % acima e, o ponto C 24 % acima. Da apreciação dos resultados do método ultra-sónico podemos dizer que os mesmos não são conclusivos acerca do estado de conservação da madeira no interior da viga, não sendo possível estabelecer um padrão de comparação dos mesmos com o resultado da média dos provetes. Face ao exposto, tentou-se estabelecer um esquema de comparação tendo como base o valor médio do ensaio ultra-sónico das vigas inspeccionadas. Posto isto, assumiu-se que as vigas com velocidade de propagação de ondas longitudinais superiores ao valor médio das vigas inspeccionadas, estão em bom estado, servindo esta análise como base de comparação.

Pela análise das Tabelas 7.9 a 7.12, o ensaio do Resistógrafo permitiu concluir que o ponto A possivelmente encontra-se deteriorado face ao resultado de 8 % abaixo da área média do perfil resistográfico no intervalo de 20 a 140 mm para os provetes e, 33 % abaixo quando relacionado com a média das vigas inspeccionadas. Fazendo-se uma análise atenta ao perfil resistográfico da viga V13 em comparação com o perfil resistográfico da média dos provetes (ver Figura 7.29), pode-se observar que existem duas zonas do perfil que indicam que a madeira tem uma redução da sua densidade, encontrando-se deteriorada ou com descontinuidades, uma localiza-se entre os 50 e os 90 mm de profundidade e, a outra localiza-se entre os 115 e os 130 mm, conforme se pode ver destacado na Figura 7.29. Ainda referente ao perfil resistográfico do conjunto dos

pontos ensaiados, verifica-se que os pontos B e C apresentam pontos do perfil que correspondem a bits mais elevados, estando associados a nós existentes na madeira.

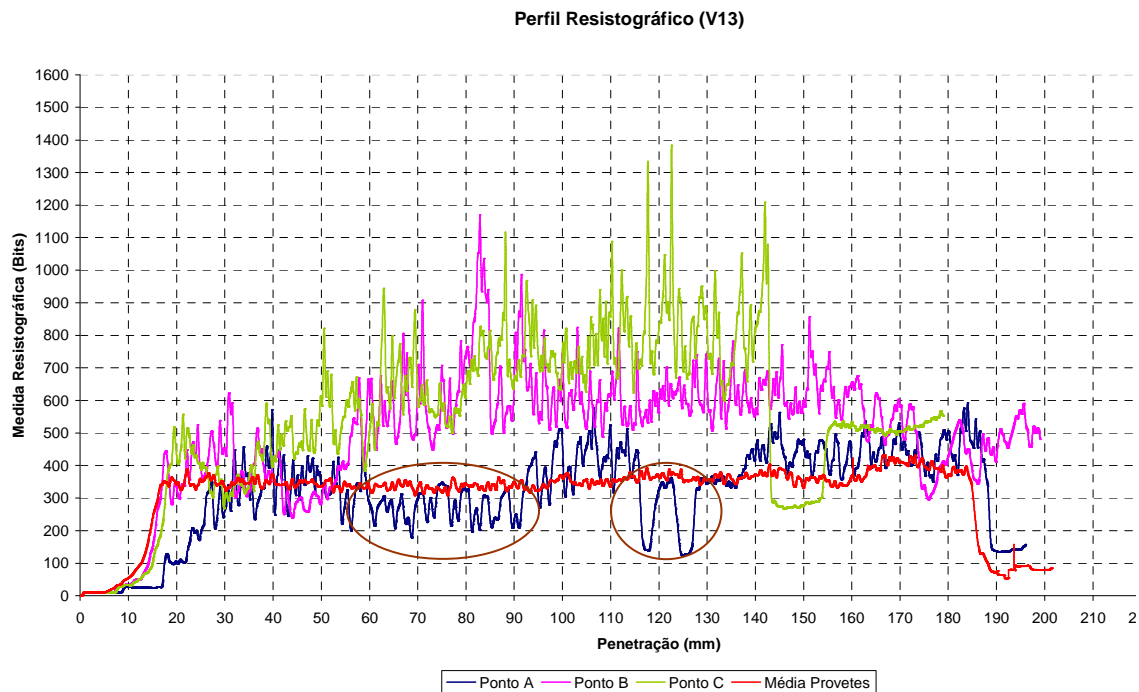


Figura 7.29 - resistográfico comparativo com os resultados da média dos provetes (viga V13).

Os perfis resistográficos dos pontos B e C no intervalo de 20 a 140 mm de profundidade, possuem uma área gráfica superior a 36 % da área obtida para a média dos provetes e, cerca de 13 % superior à área obtida da média das vigas inspeccionadas. Da análise dos perfis destes dois pontos verifica-se a inexistência de zonas degradadas ou de discontinuidades, encontrando-se toda a área gráfica acima do perfil da média dos provetes.

Relacionando os resultados dos ensaios com a inspeção visual, conclui-se que a inspeção visual permitiu verificar que a viga V13 apresenta as zonas junto aos apoios e a meio vão bastante carcomidas, encontrando-se a zona do ponto A com um aspecto deteriorado. Pela informação numérica obtida dos ensaios, o ensaio do Pilodyn no ponto A e B não é concordante com a inspeção visual, nem os resultados do método ultra-sónico se estes forem relacionados com o valor médio das vigas inspeccionadas. Quanto ao ensaio do pilodyn, tal facto poderá ser explicado pela existência de alguma zona superficial mais dura, na qual foi aplicado o Pilodyn.

É de se salientar a contradição de resultados no ponto C, observando-se que para o ensaio do Pilodyn, os resultados estão acima da média dos provetes, ao contrário dos resultados do ensaio ultra-sónico que se encontram abaixo da média dos provetes e das vigas inspeccionadas. O perfil resistográfico no mesmo ponto revela-se acima da média dos provetes e das vigas inspeccionadas. Apesar da inspecção visual confirmar que o ponto C apresenta-se deteriorado devido ao ataque do caruncho pequeno, o ensaio do Resistógrafo contradiz essa observação. A divergência entre os resultados poderá ser explicada pela avaliação pontual do ensaio do Resistógrafo, isto é, o perfil resistográfico traduz a variação da densidade da madeira ao longo da perfuração no ponto em que a agulha foi aplicada. Poderá acontecer, que a zona avaliada pelo Resistógrafo possui maior densidade, e por isso, está em melhor estado do que a zona avaliada pelos ultra-sons, e o ponto à superfície do Pilodyn.

Com base nos factos acima apresentados, e face à forte relação da inspecção visual com o método do resistógrafo, conclui-se que a viga V13 deverá ser substituída parcialmente na zona do ponto A, ou pelo menos deverá ser efectuado o seu reforço, assim como a correcção do teor em água para níveis inferiores.

#### 7.7.2.4.2 Viga V25

Pela inspecção visual da viga V25, relativamente às características físicas, constatou que o fio da madeira é inclinado e que a viga possui alguns nós visíveis.

A observação dos apoios permitiu verificar que tanto o apoio A como o C encontram-se bem ventilados. Em relação ao estado de conservação, o apoio C apresenta um aspecto deteriorado (ver Figura 7.30), tendo-se confirmado com a pancada do martelo um som médio com vibração, o que poderá significar que a secção da viga no interior da alvenaria está danificada. A utilização do formão nas faces da viga dentro da parede de alvenaria, indicou que a madeira se encontra a desenvolver fungos, facto comprovado com a lascagem de forma enrolada da madeira quando sujeita à raspagem com o formão e com a presença de manchas de humidade. Relativamente ao apoio A, este encontra-se em bom estado, apresentando um som forte com a pancada do martelo e resistente à penetração do formão.

Junto ao apoio C, numa extensão de 50 cm, existe a presença de fungos de podridão castanha,

encontrando-se a superfície da viga coberta por esporos, conforme se pode verificar na Figura 7.31.



Figura 7.30 - Aspecto da superfície da madeira no ponto C.

O facto do apoio C se encontrar muito degradado na face inferior impossibilitou a execução do ensaio do Pilodyn, do Resistógrafo e dos ultra-sons. A ausência de uma face regular e a consistência mole da madeira não permitiu um correcto funcionamento dos equipamentos, tendo-se optado por fazer os ensaios no local mais próximo do apoio C que possuía a face mais plana. Esta alteração teve efeitos nos resultados, visto considerar-se os ensaios no ponto C apesar de neste caso não terem ocorrido nesse ponto.



Figura 7.31 - Fungos de podridão castanha junto ao ponto C (viga V25).

Ao longo da viga é possível observar-se a superfície da madeira deteriorada devido ao ataque de caruncho pequeno (ver Figura 7.32), sendo visíveis os orifícios circulares com cerca de 1 - 2 mm de diâmetro. O som do martelo ao longo da viga apresenta um som oco, comprovando a existência de um ataque por caruncho com a penetração do formão até 5 cm de profundidade.





Figura 7.32 - Zonas atacadas pelo caruncho pequeno (viga V25).

Na Figura 7.33 apresentam-se os perfis resistográficos da viga V25 nos pontos A, B e C.

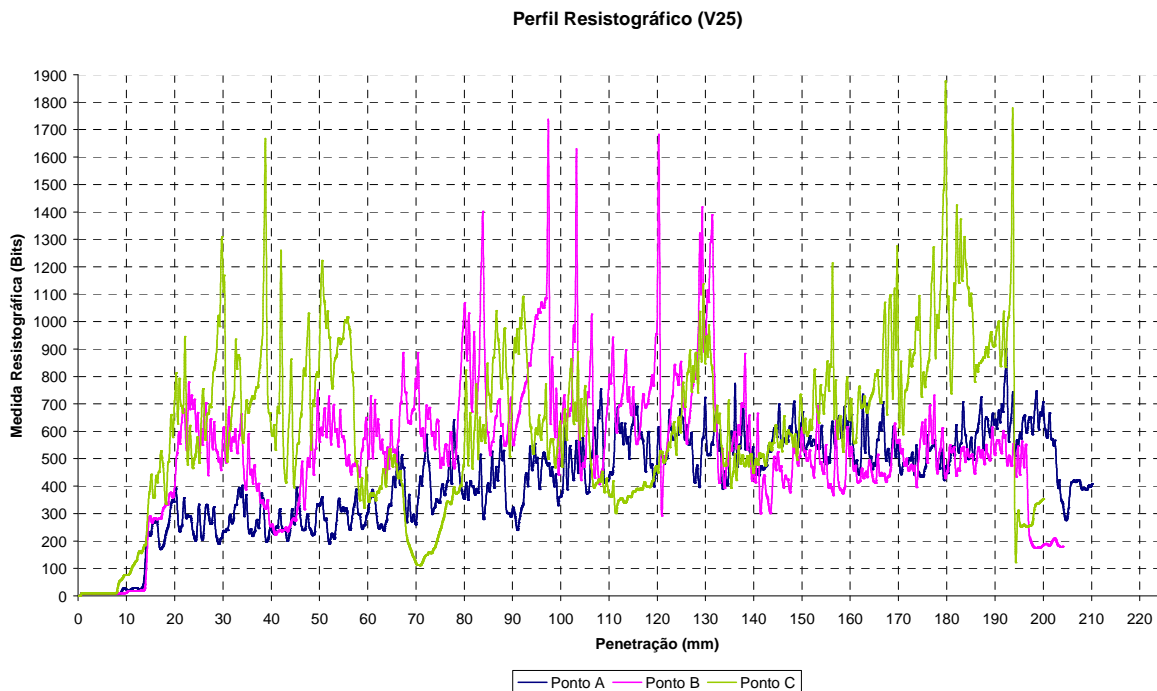


Figura 7.33 - Perfis resistográficos dos pontos A, b e C (viga V25).

Realizando-se a análise dos resultados recorrendo-se aos resultados da inspecção visual e dos diversos ensaios presentes nas Tabelas 7.9 a 7.12, constata-se que o teor em água da viga V25 apresenta valores elevados nos três pontos de ensaio e, na zona do ponto C em que se desenvolveram fungos de podridão castanha o teor em água tem o valor mais baixo dos três pontos medidos. Esta situação pode ser explicada pelo facto do ponto C ter sido sujeito a infiltrações de água, que originaram o aumento do teor em água e o consequente desenvolvimento de fungos de podridão. Com o decorrer do tempo, o antigo IPPAR foi intervindo no mosteiro resolvendo as situações mais urgentes, como a cobertura degradada, o que fez com

se solucionasse as infiltrações de água pela cobertura. Após a intervenção a madeira vai secando, reduzindo assim o seu teor em água.

O ensaio do Pilodyn nos três pontos de ensaio revelou resultados diferentes, no ponto A a dureza superficial encontra-se um pouco afectada, cerca de 12,5 % acima da média dos provetes e das vigas inspeccionadas. Relativamente ao ponto B, a penetração com o pilodyn indica que a superfície da madeira se encontra um pouco deteriorada, verificando-se pelo resultado de 28,5 % superior à média dos provetes e das vigas inspeccionadas. O ponto C, tal como foi explicado na apresentação dos resultados não retrata o apoio C mas sim uma zona próxima, visto ter sido efectuado o ensaio no ponto mais próximo possível que se encontrasse em boas condições (face plana, alguma dureza para permitir a aplicação dos equipamentos, entre outros). O apoio C encontra-se muito degradado, assumindo-se que possui uma dureza superficial muito fraca, sendo penetrado pela agulha do pilodyn na sua totalidade. O ponto que se apresenta como ponto C apresentou uma dureza superficial muito boa, cerca de 43 % inferior à média dos provetes e das vigas inspeccionadas, sendo notório que a zona ensaiada não se encontra ainda afectada pelos fungos de podridão castanha.

A utilização do método ultra-sónico permitiu constatar que a viga V25 apresenta velocidades de propagação das ondas longitudinais nos 3 pontos de ensaio inferiores à média dos provetes ensaiados, em que no ponto A é 54 % inferior, no ponto B 77 % e, no ponto C 37,97 %. Tal como foi explicado anteriormente, o ponto C neste caso não corresponde ao apoio C, devido a não ter sido possível aplicar-se os transdutores nas faces degradadas do apoio C, para além da dificuldade de se colocar o transdutor de uma forma ajustada à superfície, o próprio aparelho de medição não efectuava as leituras. Este facto, por si só indica que o apoio C se encontra bastante deteriorado. Como forma de não se perder a caracterização da zona junto apoio C, realizaram-se os ensaios de ultra-sons um pouco mais à frente, tendo-se obtido um resultado do ensaio ultra-sónico aproximadamente 38 % inferior à média dos provetes ensaiados. Comparando-se os resultados dos ultra-sons nos três pontos ensaiados, o ponto B apresenta o valor de velocidade de propagação de ondas longitudinais mais baixo, estando relacionado com uma zona de forte ataque de caruncho pequeno, tendo originado uma redução considerável da secção resistente da viga V25.



Os resultados ultra-sónicos em comparação com os resultados do mesmo ensaio nas vigas inspeccionadas, encontram-se com resultados acima da média das vigas inspeccionadas, Para o ponto A e C, 28 % e 47 % respectivamente. O ponto B possui uma velocidade 31 % inferior à média das vigas inspeccionadas.

Os resultados do ensaio resistográfico são um pouco surpreendentes, face à forte degradação existente na viga devido ao caruncho, a área do perfil resistográfico no intervalo de 20 a 140 mm, para os pontos ensaiados, é superior à área dos provetes ensaiados, no ponto A aproximadamente 14 %, 46 % no ponto B e, 43 % no ponto C. Como nos ensaios anteriores, o ponto C não corresponde ao apoio C pois não foi possível aplicar o resistógrafo nesse ponto, a fraca resistência da madeira não permitia que se executasse o ensaio em condições de se preservar a integridade da agulha de perfuração. Este acontecimento, tal como nos anteriores, revela o mau estado em que se encontra o apoio C. De qualquer forma, para se estabelecer um levantamento qualitativo da viga, efectuou-se o ensaio no mesmo local dos outros métodos, ou seja, na face inferior mais próxima do apoio C que se encontrava em boas condições. Os perfis resistográficos obtidos apresentam grandes áreas gráficas, atingindo 1700 bits no ponto B e C (ver Figura 7.34), isto quer dizer, que os picos que se observam na figura, podem corresponder a nós, a pregos ou, a outros materiais que possam estar inseridos na madeira.

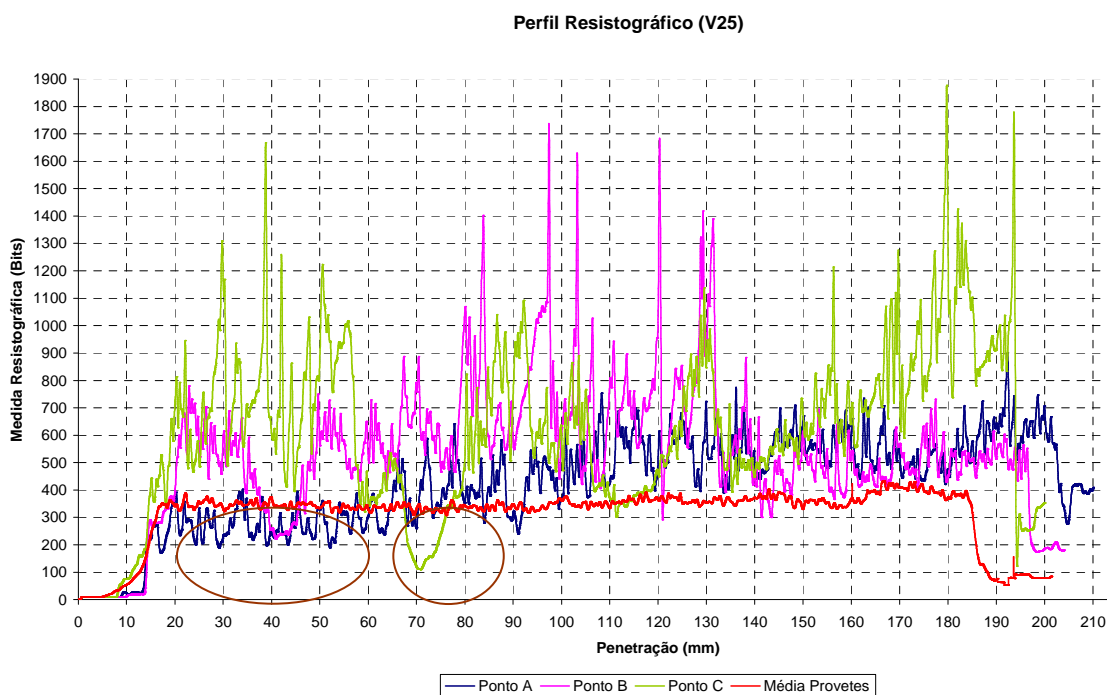


Figura 7.34 - Perfil resistográfico comparativo com os resultados da média dos provetes (viga V25).

Observando-se com atenção a Figura 7.34, verifica-se que existem pontos dos perfis que se localizam abaixo do perfil resistográfico correspondente à média dos provetes ensaiados. Esses pontos, caracterizam zonas da madeira de menor densidade, normalmente associadas a ataques biológicos, ou a fissuras e, pode-se constatar que no perfil do ponto A entre os 15 e os 55 mm de profundidade a viga V25 apresenta alguma forma de deterioração. No ponto C também é possível detectar-se uma zona degradada entre os 68 e os 76 mm de profundidade. Apesar das zonas de fraca densidade visíveis nos perfis, o ensaio resistográfico não apresentou resultados fracos para a viga em questão, basta que se relacionem os resultados com a média das vigas inspeccionadas (ver Tabela 7.12) para se concluir que são satisfatórios. No ponto B a área do perfil resistográfico no intervalo de 20 a 140 mm é superior à média das vigas inspeccionadas em aproximadamente 26 %, no ponto C também é superior em 22 %, apenas o ponto A apresenta uma área 15 % inferior à média das vigas inspeccionadas.

Procedendo-se à análise dos resultados obtidos, a inspecção visual permitiu determinar que a viga V25 está muito degradada, sendo notório apenas pelo aspecto visual que a mesma não reúne condições de segurança para desempenhar uma função estrutural. A zona da viga atacada por fungos de podridão castanha começa a exibir uma superfície mole, estando-se a alterar pela acção dos fungos. Na zona do apoio C que antecede os fungos de podridão, a penetração do formão confirma o alastramento dos fungos, confirmado pelas lascas enroladas através da raspagem do formão. Ao longo da viga ao aplicarmos o formão, ocorre uma penetração de aproximadamente 50 mm, denunciando um forte ataque de caruncho pequeno que já terá reduzido em 50 mm a secção resistente da viga. A aplicação de pancadas com o martelo ao longo da viga denunciou um som oco, confirmando a existência de madeira deteriorada pela acção do caruncho. Ao bater-se com o martelo no apoio C, a viga adquire uma vibração excessiva, provavelmente este fenómeno deverá estar relacionado com a reduzida secção apresentada pela viga no apoio C, visto as dimensões serem mais reduzidas, a viga poderá estar a perder estabilidade.

Perante a informação recolhida dos resultados dos ensaios e da inspecção visual, a relação entre ambos revela uma discordância nos resultados relação aos pontos mais deteriorados B e C, dado que apresentam resultados superiores à média dos provetes e até à média das vigas inspeccionadas. Relativamente ao ponto C já foi referido diversas vezes, que os resultados

obtidos não retratam o apoio C mas sim um ponto mais afastado, mas de qualquer forma como a proximidade ao apoio C é grande, não se compreende os resultados satisfatórios obtidos numa zona carunchada e junto a fungos de podridão. Com a excepção dos ultra-sons, quer o pilodyn, quer o resistógrafo são métodos de ensaio locais, o que significa que poderão estar a caracterizar apenas o ponto ensaiado, sem qualquer representatividade na viga, ou noutras zonas da viga. Pode acontecer que o ponto ensaiado possua mais madeira do cerne do que outros pontos, e que por esse motivo não tenha sofrido uma deterioração significativa. O facto de se saber que o apoio C não exibiu condições para se efectuarem os ensaios confirma os factos recolhidos pela inspecção visual.

Conjugando-se toda a análise efectuada à informação extraída da inspecção visual e dos resultados conclui-se que a viga V25 não oferece condições de segurança, nem de sanidade, devido à possibilidade de contágio dos fungos às outras vigas adjacentes. Perante o exposto, a viga apresenta um mau estado de conservação devendo ser substituída. Os agentes biológicos que conduziram à degradação da madeira foram despoletados pelo excesso do teor em água, situação que não se encontra totalmente resolvida, visto o pavimento do piso superior se encontrar totalmente deformado e em mau estado de conservação. A própria fachada exterior junto à cobertura e no piso superior poderá possuir fendas ou encontros dos apoios mal vedados, permitindo a infiltração de água pela cobertura, alcançando todas as vigas que se encontrem apoiadas na parede de alvenaria de granito. Solicita-se assim que a intervenção para além da substituição integral da viga passe também por serem corrigidos todos os pormenores construtivos que influenciem a presença da água no interior do mosteiro.

## 7.8 Bibliografia - Capítulo 7

- [7.01] [www.ippar.pt/monumentos/conjunto\\_pombeiro.htm](http://www.ippar.pt/monumentos/conjunto_pombeiro.htm);
- [7.02] [www.cm-felgueiras.pt/nr/rdonlyres/d5484839-7575-403A-AA8F-184022C55CDD/336/mosteirpombeiro84x84.jpg](http://www.cm-felgueiras.pt/nr/rdonlyres/d5484839-7575-403A-AA8F-184022C55CDD/336/mosteirpombeiro84x84.jpg);
- [7.03] [www.mjfs.wordpress.com/2008/04/18/mosteiro-de-pombeiro-felgeiras/](http://www.mjfs.wordpress.com/2008/04/18/mosteiro-de-pombeiro-felgeiras/);
- [7.04] ERASUN, RICARDO ; *XII ENCONTRO DE HISTÓRIA LOCAL - Pombeiro, à luz da arqueologia*. Museu de Alberto Sampaio.
- [7.05] OLIVEIRA, EDUARDO P. ; *O mosteiro de pombeiro*.

## 8. CONCLUSÕES

### 8.1 Considerações Gerais

Como principais conclusões deste trabalho é possível afirmar que a inspecção visual revela-se como um método eficaz para a inspecção e diagnóstico de estruturas de madeira, tendo apresentado concordância com os resultados obtidos pelo Pilodyn e Resistógrafo. Apesar de puramente qualitativa, a análise visual é de grande utilidade e deverá funcionar como suporte dos diversos ensaios não destrutivos que possam ser utilizados/aplicados no restante processo de inspecção e diagnóstico.

O ensaio dos ultra-sons apresenta uma grande dispersão nos resultados, não apresentando qualquer correlação com os outros ensaios, e em muitas das zonas visualmente degradadas este apresentavam valores superiores ao expectável e confirmado pelos demais ensaios. O mau desempenho dos ultra-sons pode ser explicado por erro humano no procedimento de ensaio, pela dificuldade física de realização do ensaio (por baixo da viga e em cima de uma escada metálica) que, faz variar a pressão exercida nos transdutores. As faces irregulares das vigas também contribuem para que a velocidade de propagação das ondas seja alterada, e o transdutor ao não estar totalmente em contacto com a superfície dos elementos provoca uma diminuição da velocidade de propagação das ondas (o ar é mau condutor). Daqui resulta que os ultra-sons são um ensaio que revela limitações quando aplicado *in situ*.

Na grande maioria das vigas não se notou a influência do teor em água nos resultados dos ensaios não destrutivos. Não se verificou o princípio teórico de que o teor em água diminui a resistência da madeira, tendo-se observado que em vigas deterioradas o teor em água era inferior em comparação a outras vigas em bom estado com um teor em água superior. Esta situação poderá ser explicada pelo facto de que possivelmente nas vigas que apresentam teor em água elevado e não se encontram deterioradas exista uma maior quantidade de madeira do cerne, sendo esta madeira mais resistente aos ataques biológicos. Por outro lado, as vigas que estão deterioradas e apresentam um teor em água mais baixo, pelo próprio local em que estavam inseridas, ou até mesmo pelas dimensões inferiores, podem ter sofrido uma secagem mais rápida, sofrendo os danos quando a madeira estava mais húmida.

O resistógrafo revelou-se como um ensaio com bom desempenho para a inspecção e diagnóstico de estruturas de madeira, detectando zonas deterioradas no interior das vigas, impossíveis de detectar através da inspecção visual.

O pilodyn apresentou um bom comportamento na inspecção às vigas em estudo, tendo apresentado resultados de profundidade de penetração elevada em vigas que estavam verdadeiramente atacadas superficialmente pelo caruncho.

Através da informação obtida podemos afirmar que as vigas V1, V4, V6, V9, V10 e V13, deverão ser substituídas parcialmente num dos apoios, conforme indicado na análise de resultados. As vigas V7, V25 e F3, deverão ser substituídas totalmente por vigas novas, encontrando-se em mau estado de conservação. Por sua vez, as vigas V2, V5, V8, V21, V22, V24 e F2, encontram-se em bom estado, devendo ser mantidas.

A metodologia utilizada neste trabalho, na prática traduziu-se numa poupança de custos na intervenção futura na área de estudo no Mosteiro de Santa Maria de Pombeiro. Assim, caso se procedesse à substituição de todo o vigaamento, considerando a substituição das vigas principais degradadas por vigas novas de carvalho (aproximadamente 3 m<sup>3</sup>), estimando-se que o carvalho apresenta um custo de fornecimento e aplicação que ronda os 1300,00 € / m<sup>3</sup>, a intervenção custaria 3900,00 €. Considerando-se que uma intervenção seria efectuada de acordo com os resultados obtidos, e supondo que as vigas a substituir parcialmente seriam reforçadas com 1 ml de nova secção, o custo da intervenção (aproximadamente 0,44 m<sup>3</sup>) seria de 572,00 €. Como se pode constatar, um procedimento de inspecção e diagnóstico com recurso a ensaios não destrutivos pode proporcionar uma poupança de 85 % , em relação à substituição de toda a estrutura.

À laia de resumo, podemos afirmar que a adopção de uma correcta metodologia de inspecção e diagnóstico, recorrendo a ensaios não destrutivos, contribui de uma forma determinante para a avaliação qualitativa de uma estrutura de madeira em serviço, já em termos de análise quantitativa o mesmo não acontece sendo normalmente necessário o recurso a ensaios destrutivos, com a extracção de carotes/amostras.

## **8.2 Sugestões para Futuro Trabalho**

Existem outros ensaios não destrutivos como a termografia e infra-vermelhos que poderiam ser incluídos no procedimento de inspecção apresentado, alertando para a forma de funcionamento dos equipamentos, e comparando-os com os ensaios não destrutivos utilizados neste trabalho.

Apesar da grande dificuldade de se estabelecerem valores de referência para os resultados obtidos pelos ensaios não destrutivos na madeira, devido à heterogeneidade da madeira que origina uma variabilidade nas suas propriedades, era interessante existirem valores de referência para as espécies de madeira mais usuais nas estruturas antigas do nosso país.

A investigação e o desenvolvimento de equipamentos que permitam detectar a existência de insectos activos no interior da madeira, seria um avanço positivo para o diagnóstico das estruturas de madeira.

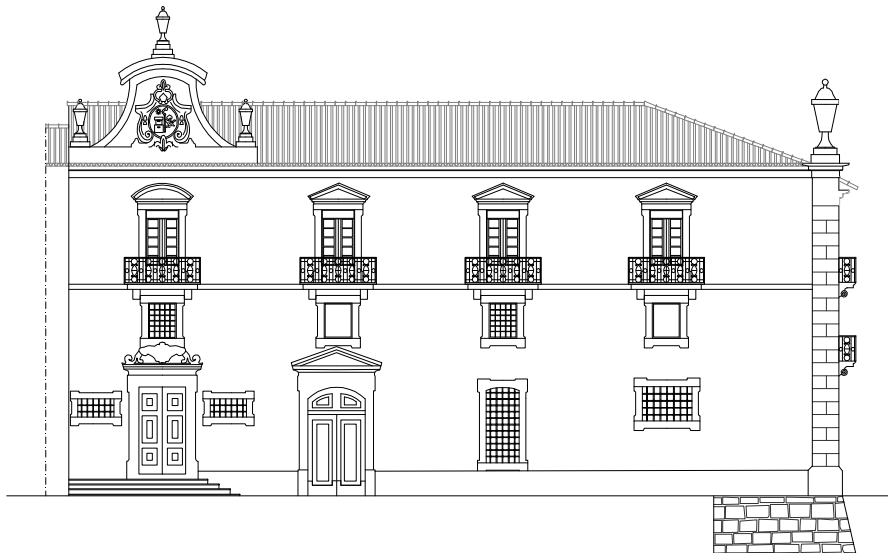




**ANEXO 1 - Plantas e Alçados do Mosteiro de Santa  
Maria de Pombeiro**

## ANEXO 1 - PLANTAS E ALÇADOS DO MOSTEIRO DE SANTA MARIA DE POMBEIRO

Apresentam-se nas Figuras A.1.1 e A.1.2 os Alçados Norte e Sul do Mosteiro de Santa Maria de Pombeiro.



Alçado Norte

Figura A.1.1 - Alçado Norte do Mosteiro de Santa Maria de Pombeiro (sem escala).



Alçado Sul

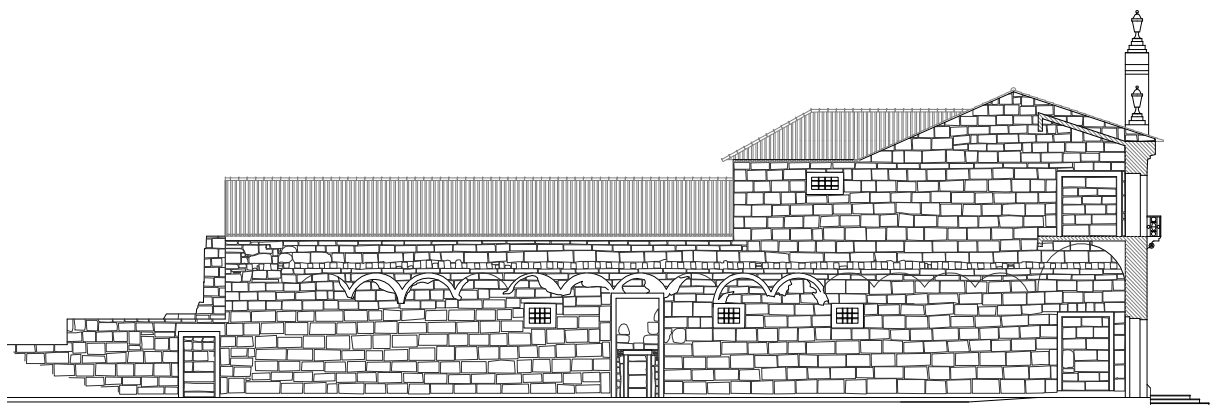
Figura A.1.2 - Alçado Norte do Mosteiro de Santa Maria de Pombeiro (sem escala).

Apresentam-se nas Figuras A.1.3 e A.1.4 os Alçados Poente e Nascente do Mosteiro de Santa Maria de Pombeiro.



Alçado Poente

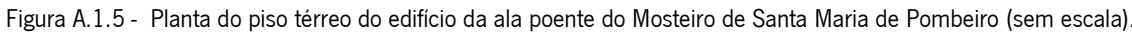
Figura A.1.3 - Alçado Poente do Mosteiro de Santa Maria de Pombeiro (sem escala).



Alçado Nascente

Figura A.1.4 - Alçado Nascente do Mosteiro de Santa Maria de Pombeiro (sem escala).

Nas Figuras A.1.5 a A.1.7, podem-se observar as plantas do piso térreo, do primeiro piso e do segundo piso do edifício da ala poente do Mosteiro de Santa Maria de Pombeiro.



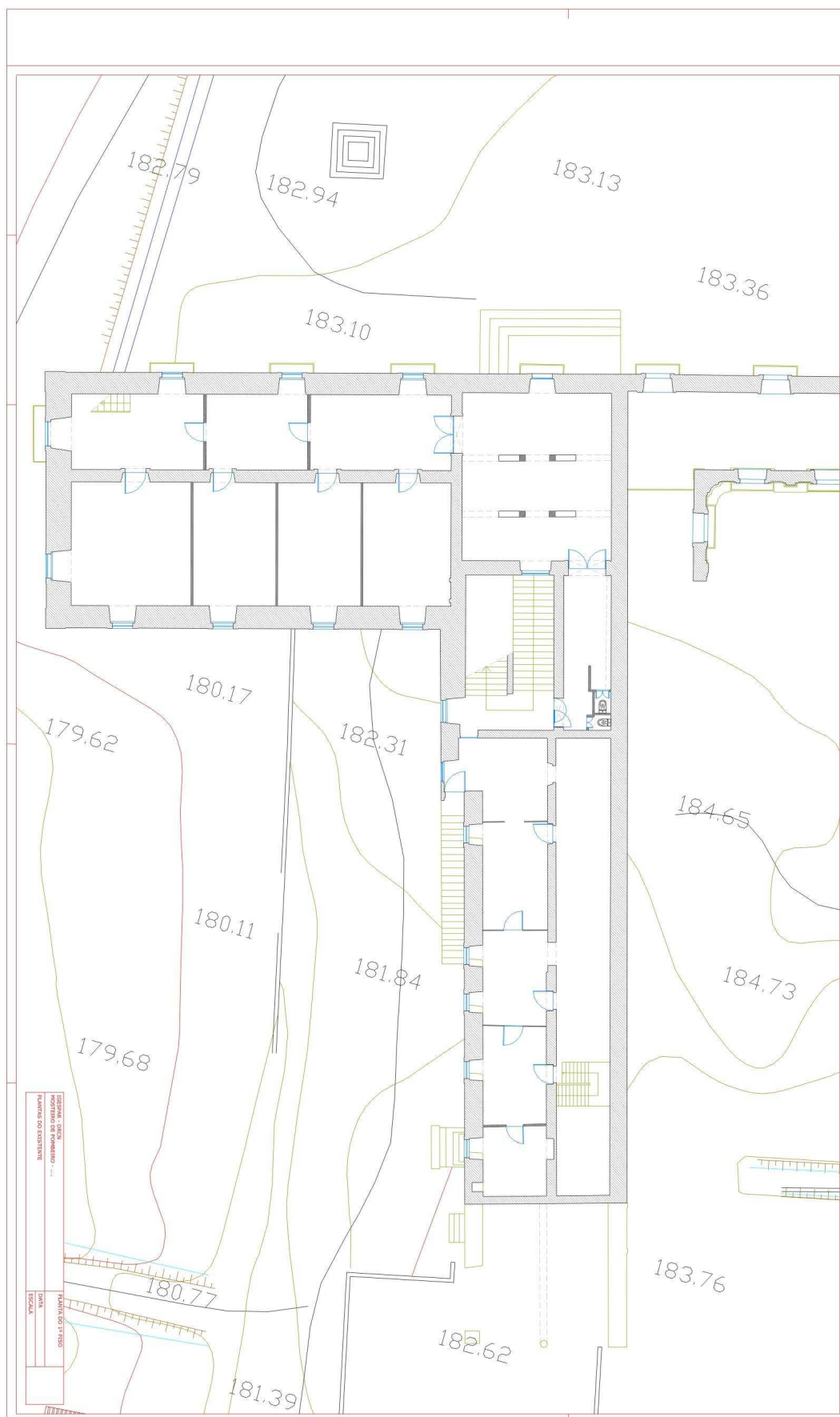


Figura A.1.6 - Planta do primeiro piso do edifício da ala ponte do Mosteiro de Santa Maria de Pombeiro (sem escala).

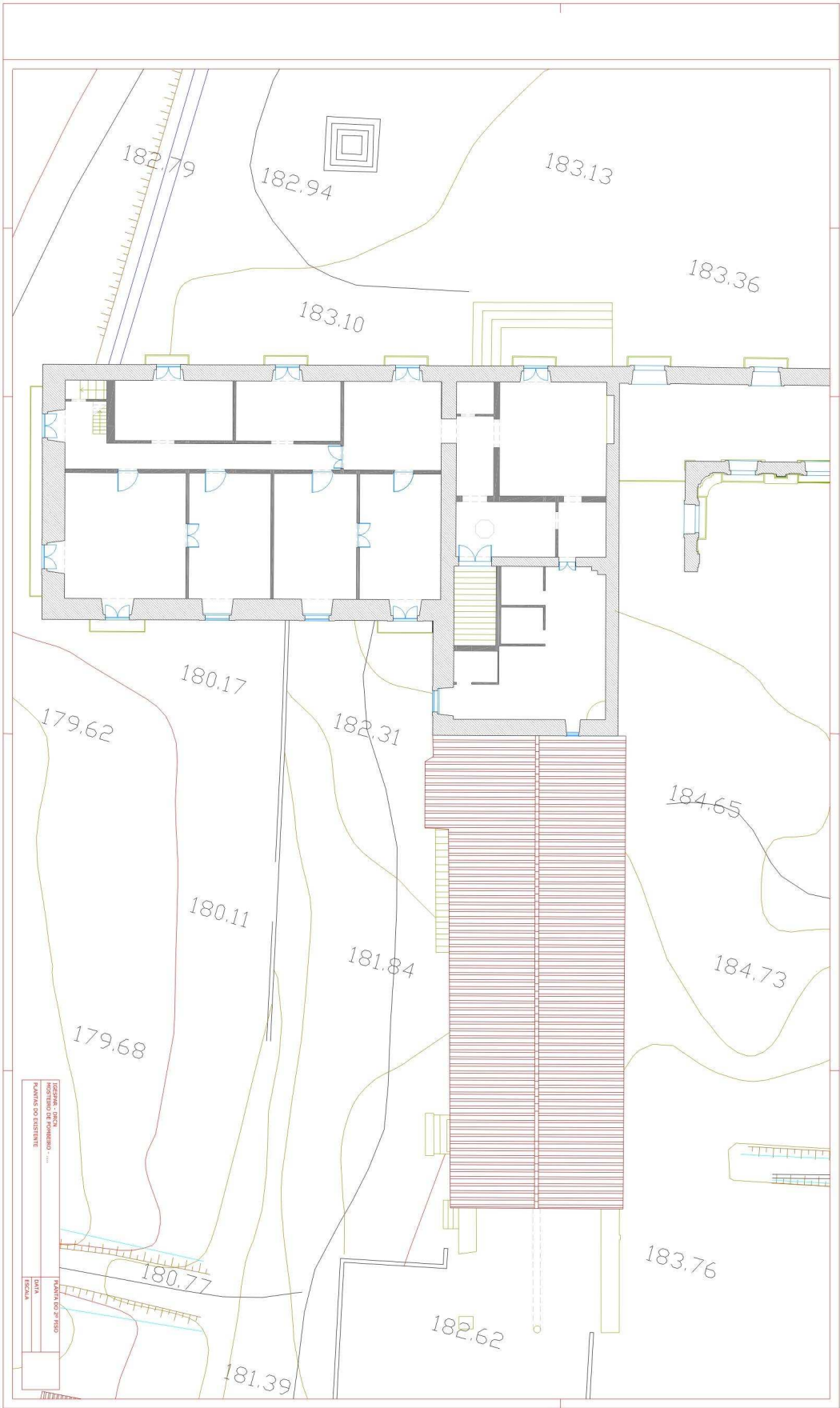


Figura A.1.7 - Planta do segundo piso do edificio da ala poente do Mosteiro de Santa Maria de Pombeiro (sem escala).

## **ANEXO 2 - CORRELAÇÕES ENTRE OS RESULTADOS DOS ENSAIOS DOS PROJETOS**

## ANEXO 2 - Correlações entre os Resultados dos Ensaio dos Provetes

Os resultados obtidos com o procedimento experimental podem ser relacionados entre si, proporcionando uma leitura gráfica que poderá confirmar pressupostos entre os diversos equipamentos de ensaio. A Figura A.2.1 ilustra a relação entre a velocidade das ondas longitudinais, obtidas com os ultra-sons e a profundidade de penetração avaliada com o Pilodyn.

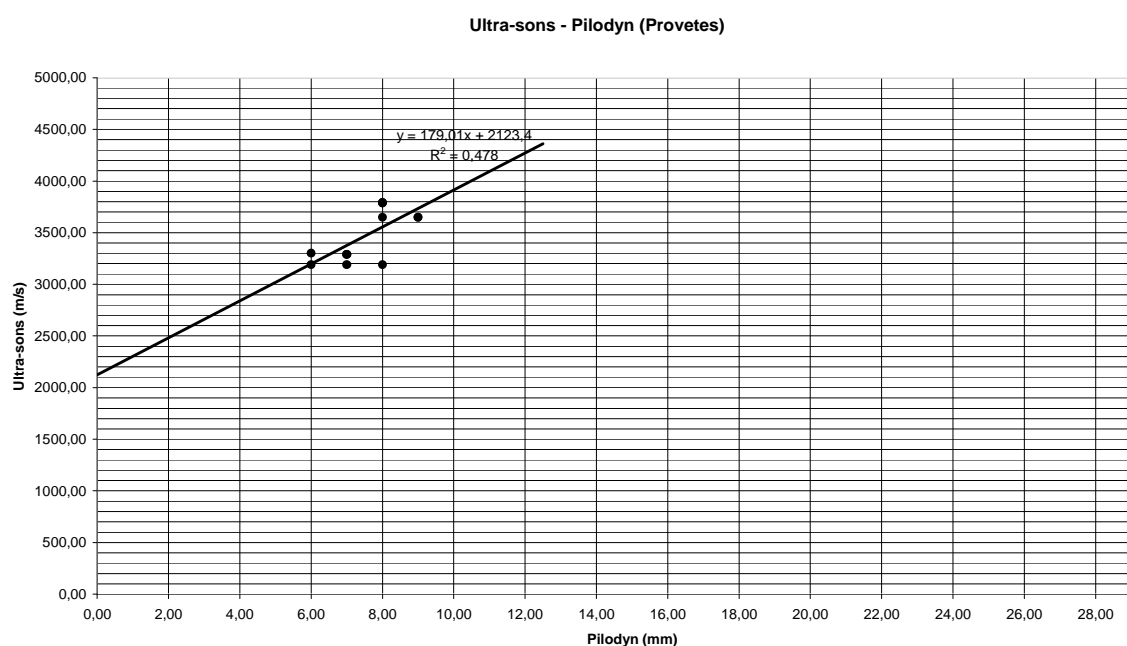


Figura A.2.1 - Ultra-sons Versus Pilodyn (provetes).

A Figura A.2.2 apresenta relação entre o ensaio do Pilodyn e o teor em água.



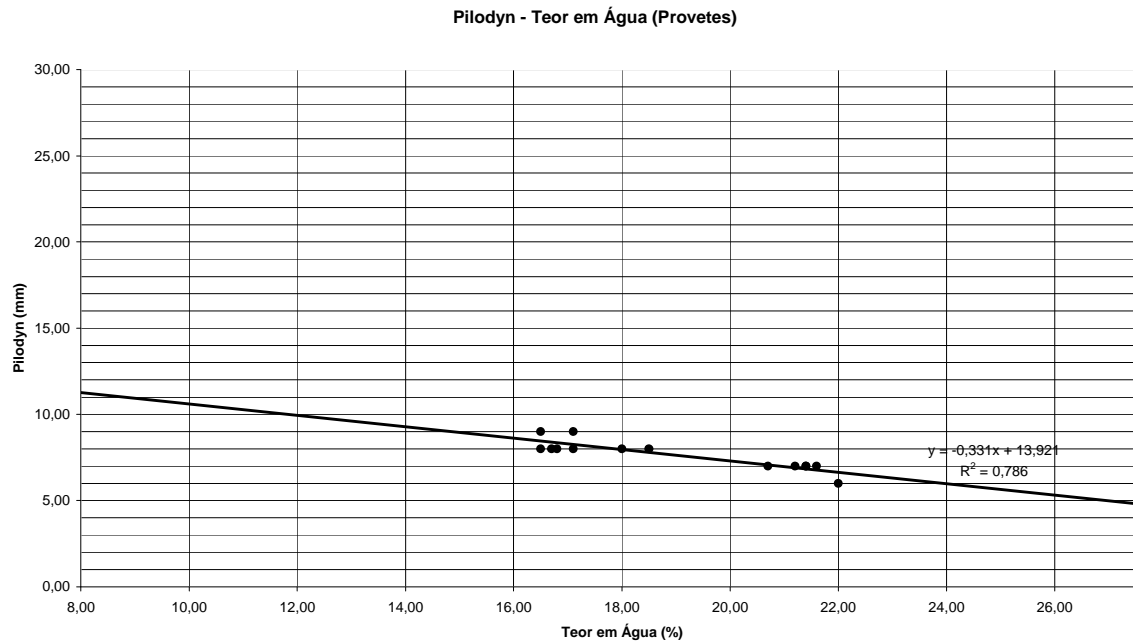


Figura A.2.2 - Pilodyn Versus Teor em Água.

A Figura A.2.3 apresenta a relação entre a velocidade das ondas longitudinais obtidas pelo ensaio de ultra-sons e o teor em água para os provetes ensaiados.

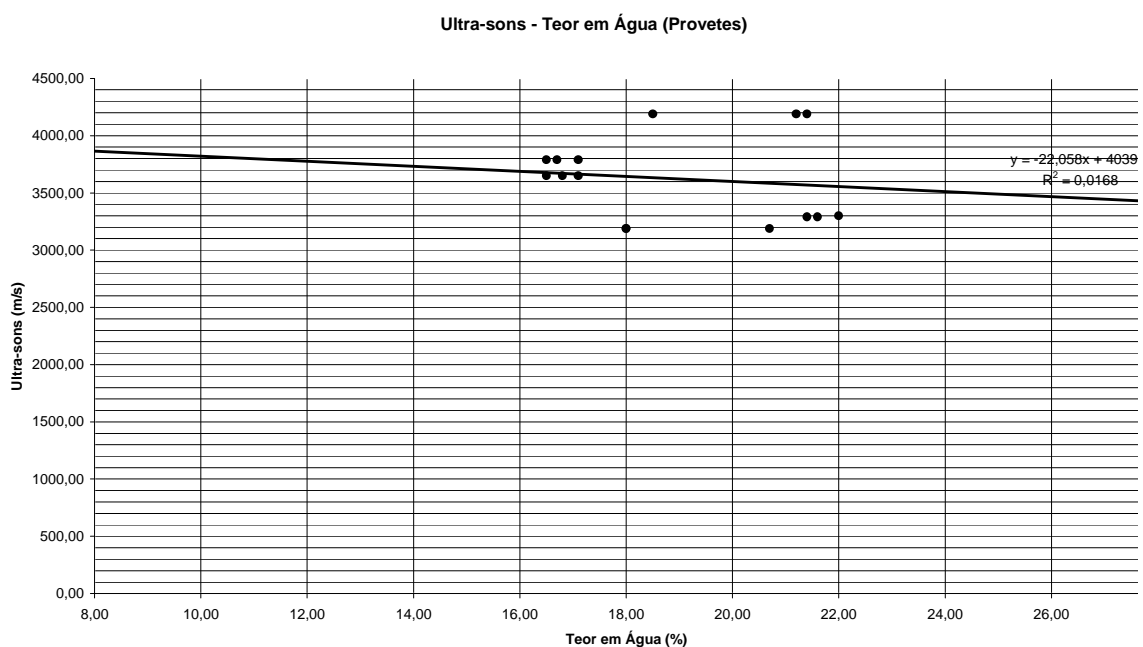


Figura A.2.3 - Pilodyn Versus Teor em Água.

A Figura A.2.4 apresenta a relação entre a área obtida do perfil resistográfico entre os 20 e os 140 mm de profundidade de penetração e o teor em água para os provetes ensaiados.

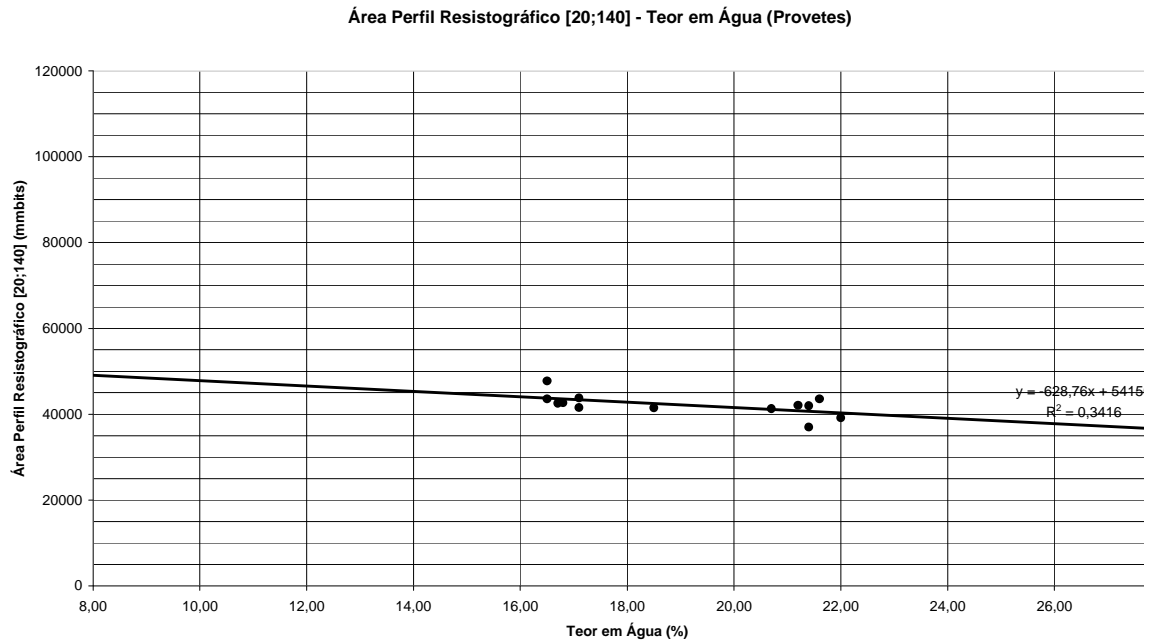


Figura A.2.4 - Área Perfil Resistográfico [20;140] Versus Teor em Água.

A Figura A.2.5 traduz a relação obtida para os provetes, entre a área obtida pelo gráfico resistográfico entre os 20 e os 140 mm de profundidade de penetração e, a profundidade de penetração pelo ensaio do Pilodyn para os provetes ensaiados.

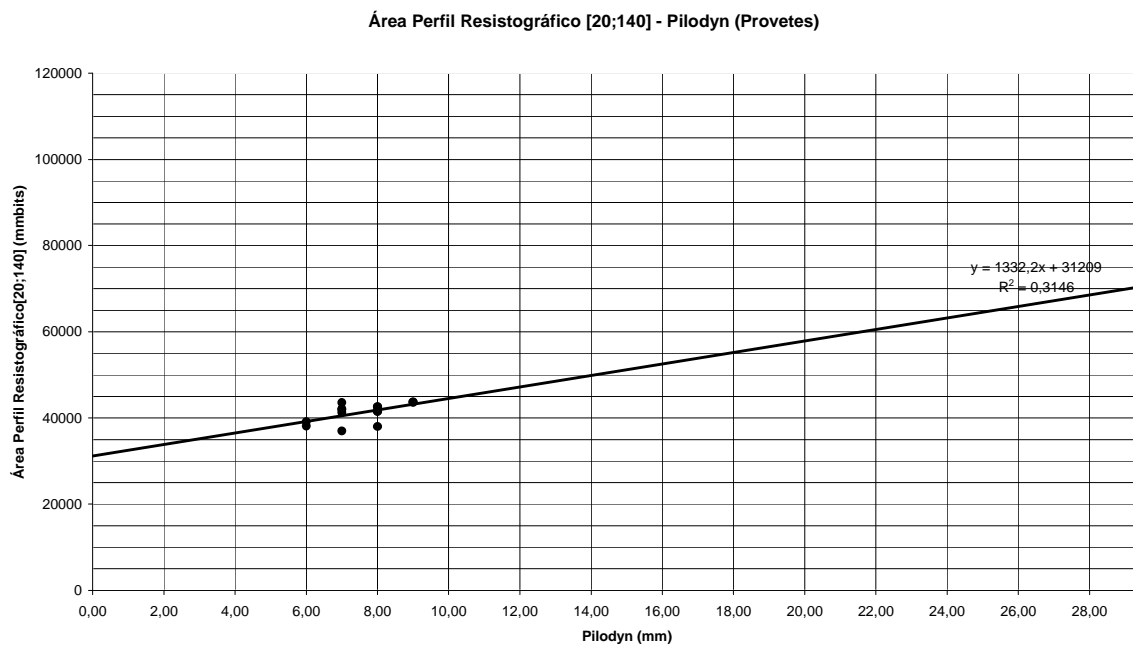


Figura A.2.5 - Área Perfil Resistográfico[20;140] Versus Pilodyn.

A Figura A.2.6, apresenta a relação obtida para os provetes, entre a área do gráfico resistográfico entre os 20 e os 140 mm de profundidade de penetração e, a velocidade das ondas longitudinais conseguida pelos ultra-sons.

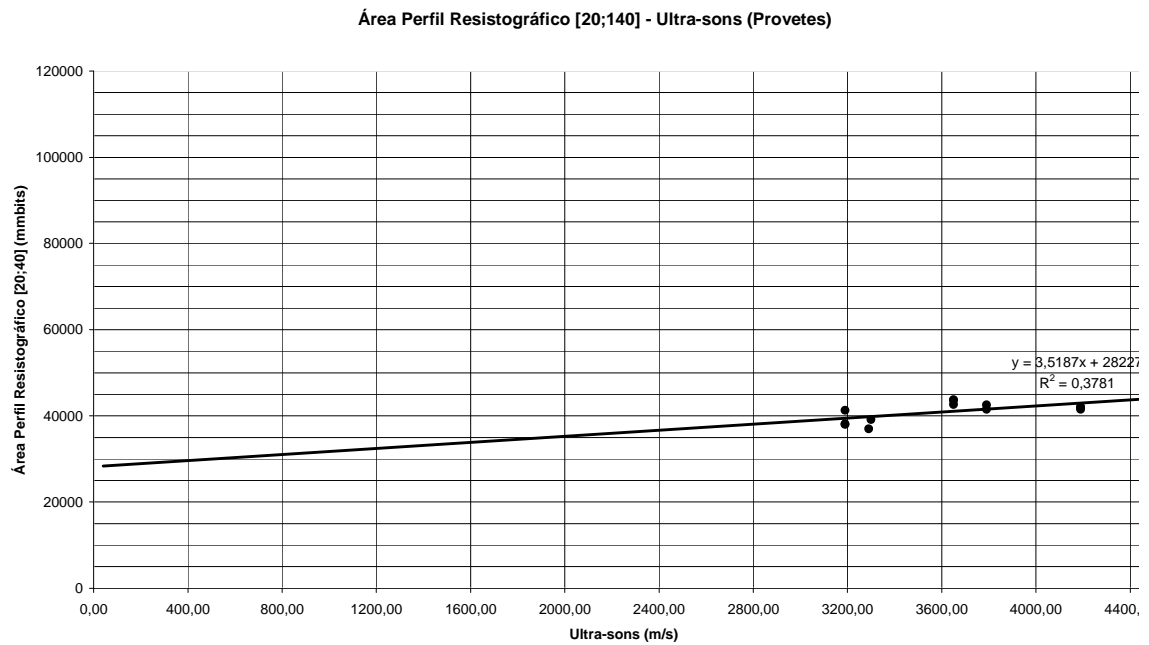


Figura A.2.6 - Área Perfil Resistográfico [20;140] Versus Ultra-sons.



## **ANEXO 3 - PERFIS RESISTOGRÁFICOS DE TODAS AS VIGAS INSPECCIONADAS**

## ANEXO 3 - PERFIS RESISTOGRÁFICOS DE TODAS AS VIGAS INSPECCIONADAS

Na Figura A.3.1 apresenta-se o perfil resistográfico da viga V1.

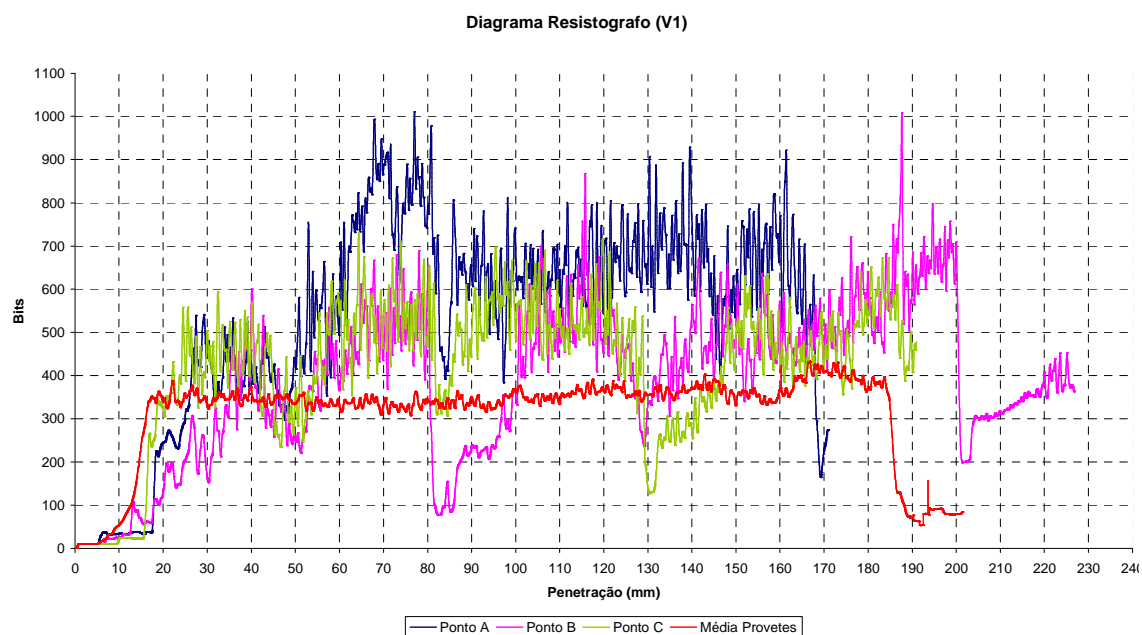


Figura A.3.1 - Perfil resistográfico viga V1.

Na Figura A.3.2 apresenta-se o perfil resistográfico da viga V2.

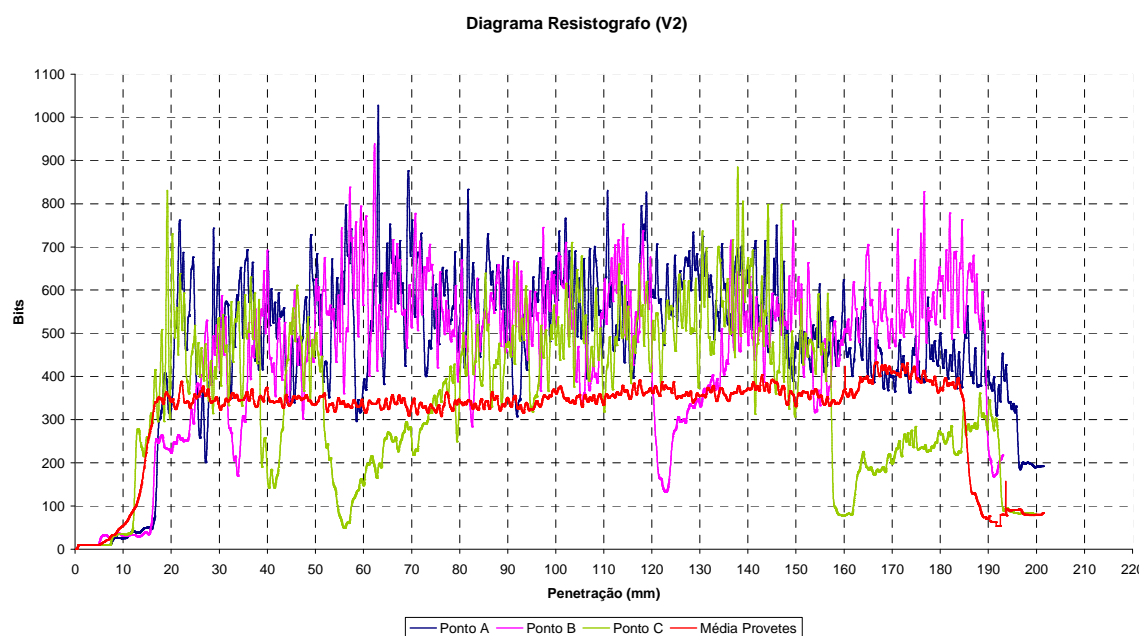


Figura A.3.2 - Perfil resistográfico da viga V2.

Na Figura A.3.3 apresenta-se o perfil resistográfico da viga V3.

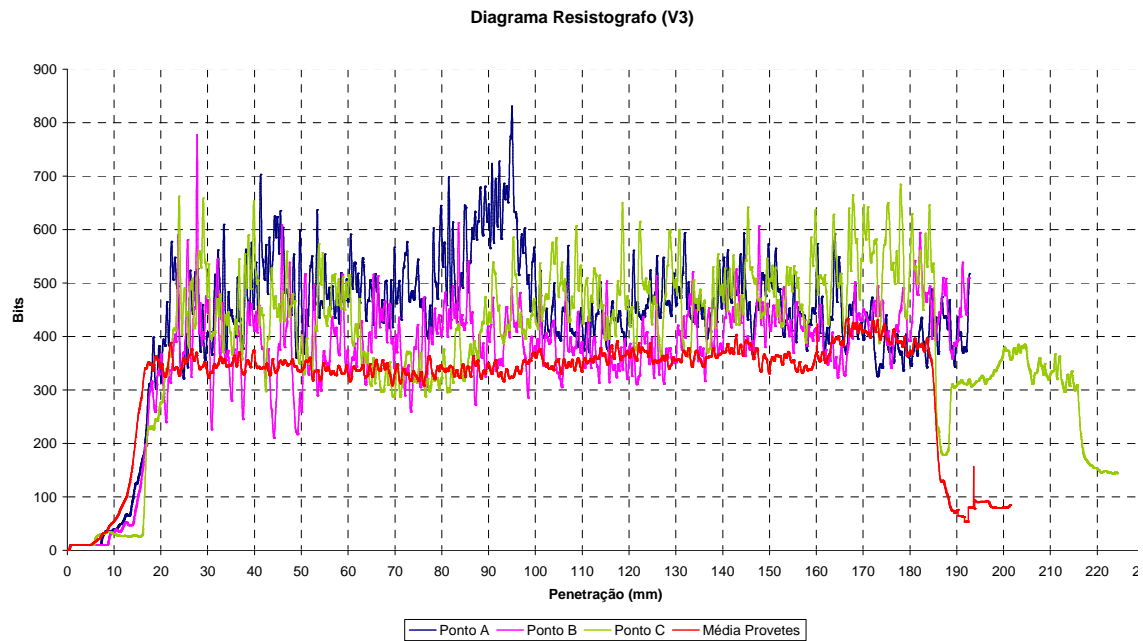


Figura A.3.3 - Perfil Resistográfico viga V3.

Na Figura A.3.4 apresenta-se o perfil resistográfico da viga V4.

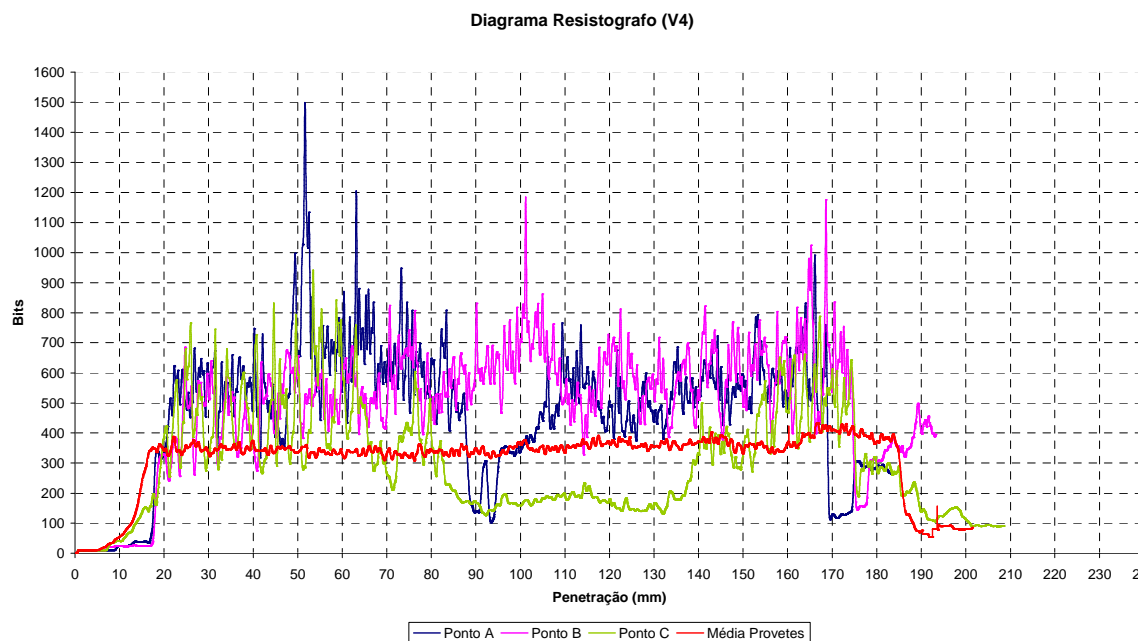


Figura A.3.4 - Perfil resistográfico viga V4.

Na Figura A.2.5 apresenta-se o perfil resistográfico da viga V5.

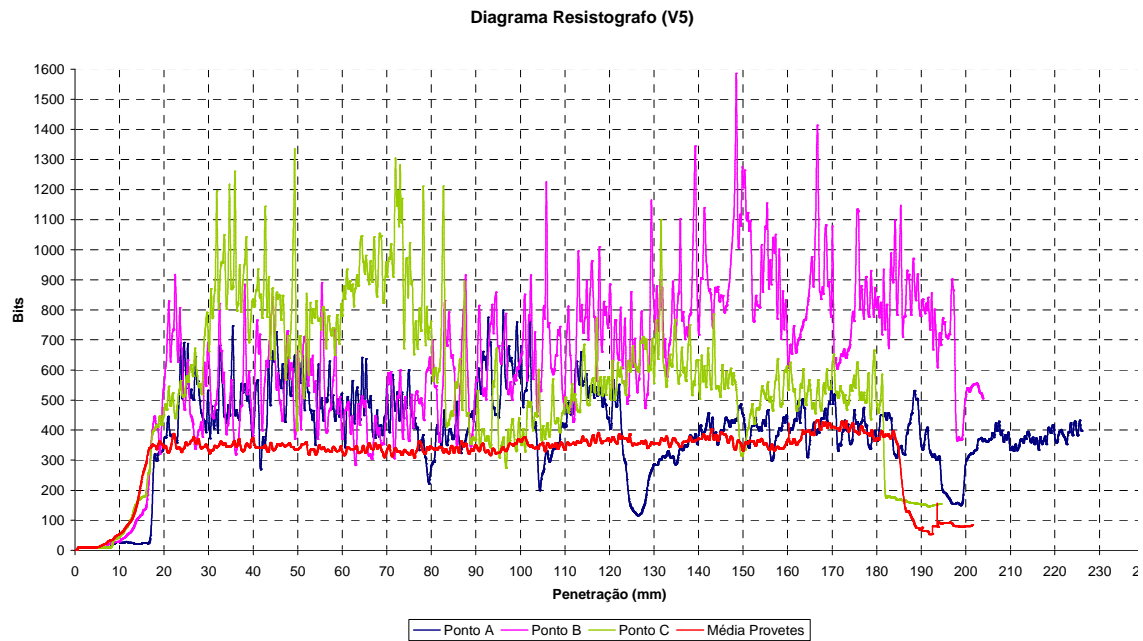


Figura A.3.5 - Perfil resistográfico viga V5.

Na Figura A.2.6 apresenta-se o perfil resistográfico da viga V6.

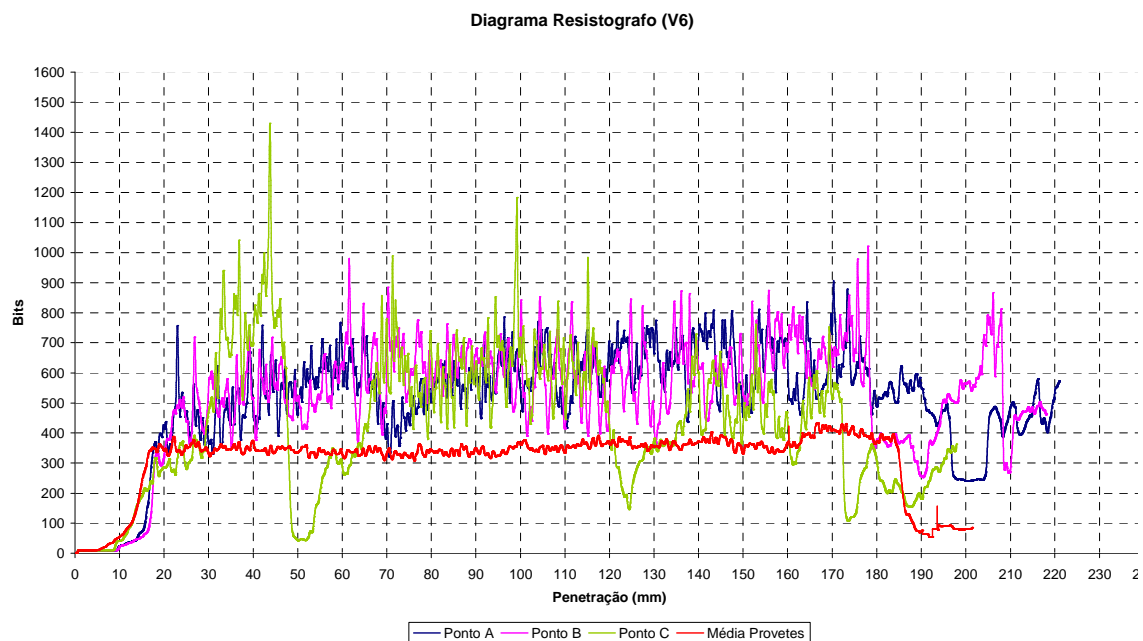


Figura A.3.6 - Perfil resistográfico viga V6.



Na Figura A.3.7 apresenta-se o perfil resistográfico da viga V7.

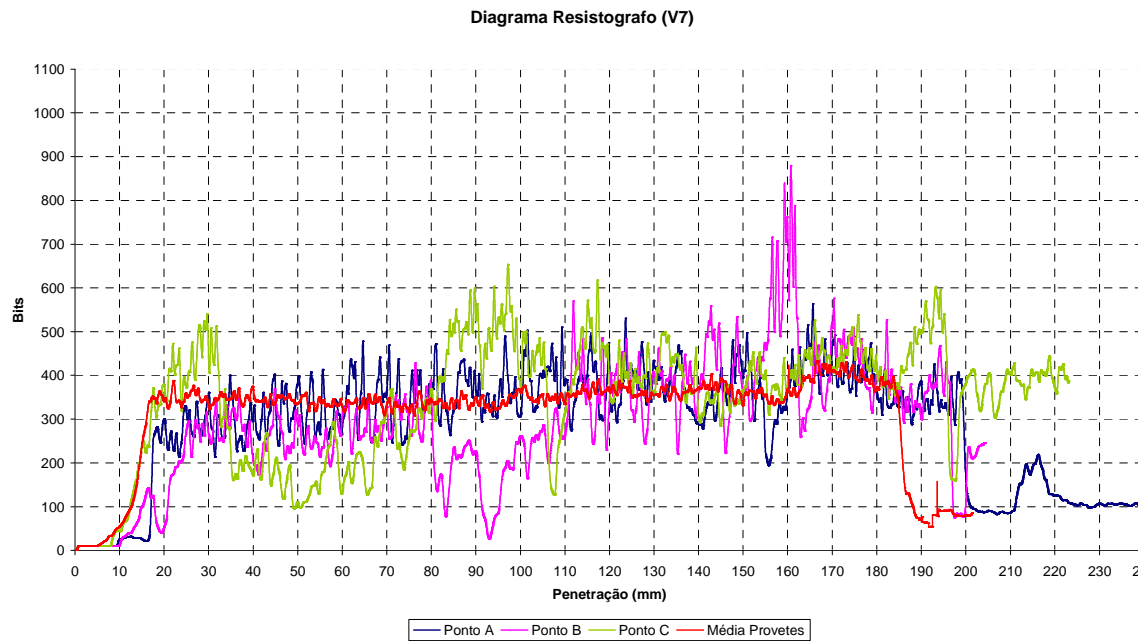


Figura A.3.7 - Perfil resistográfico viga V7.

Na Figura A.3.8 apresenta-se o perfil resistográfico da viga V8.

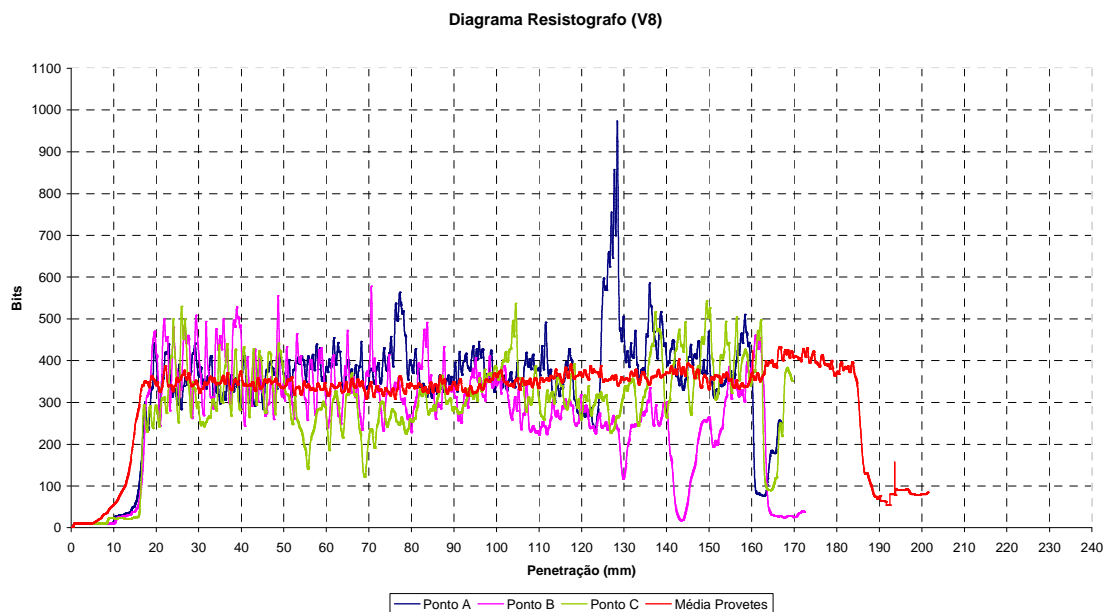


Figura A.3.8 - Perfil resistográfico viga V8.

Na Figura A.3.9 apresenta-se o perfil resistográfico da viga V9.

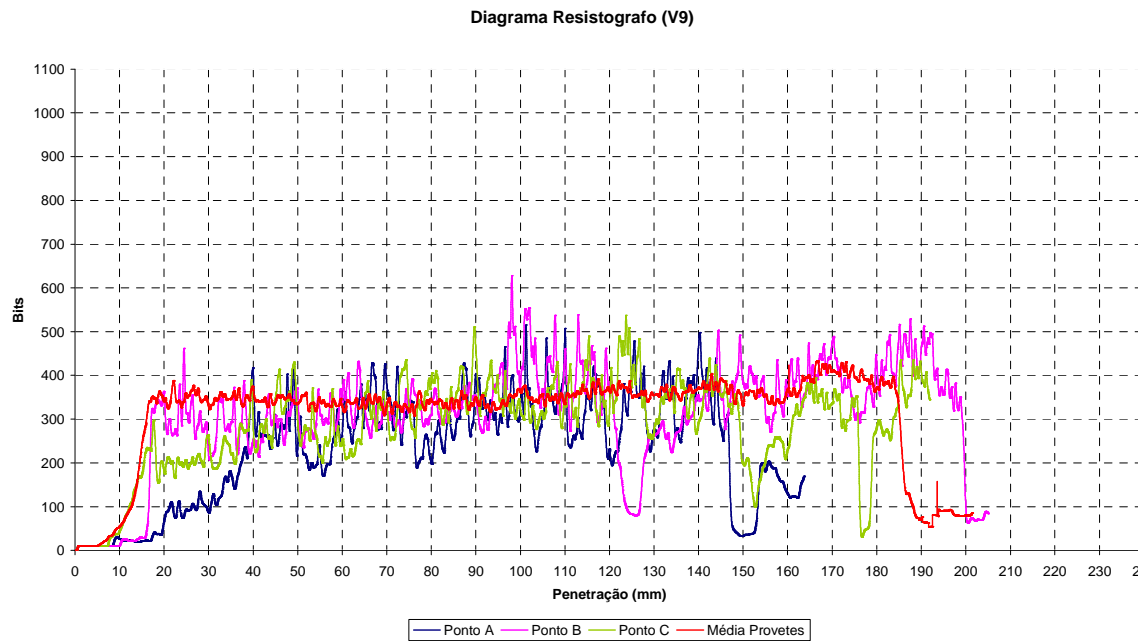


Figura A.3.9 - Perfil resistográfico viga V9.

Na Figura A.3.10 apresenta-se o perfil resistográfico da viga V10.

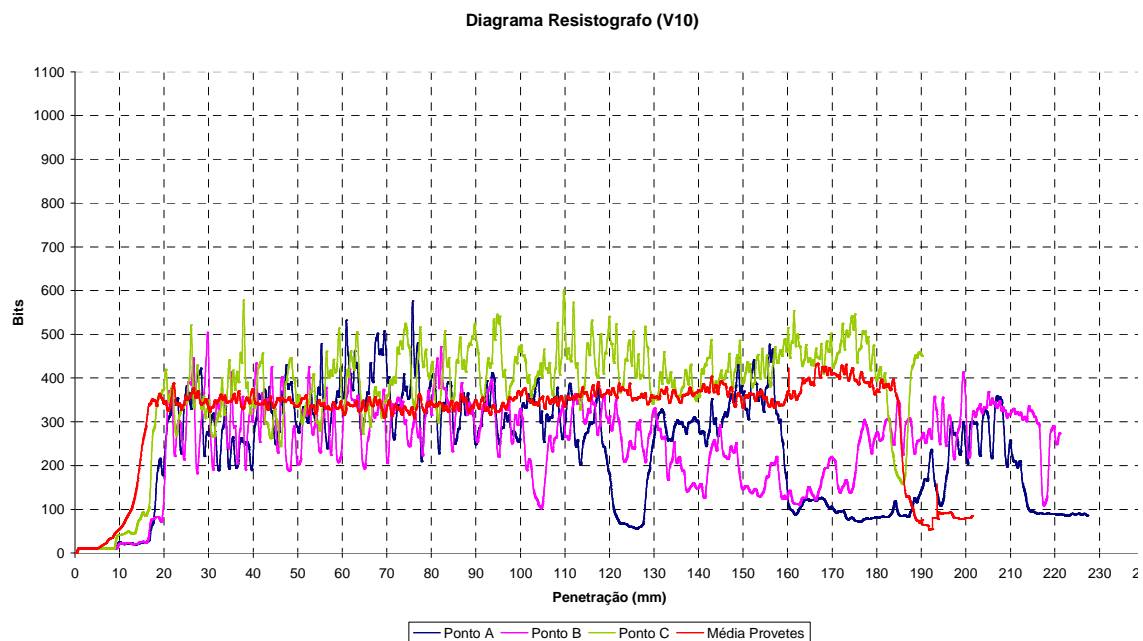


Figura A.3.10 - Perfil resistográfico viga V10.

Na Figura A.3.11 apresenta-se o perfil resistográfico da viga V13.

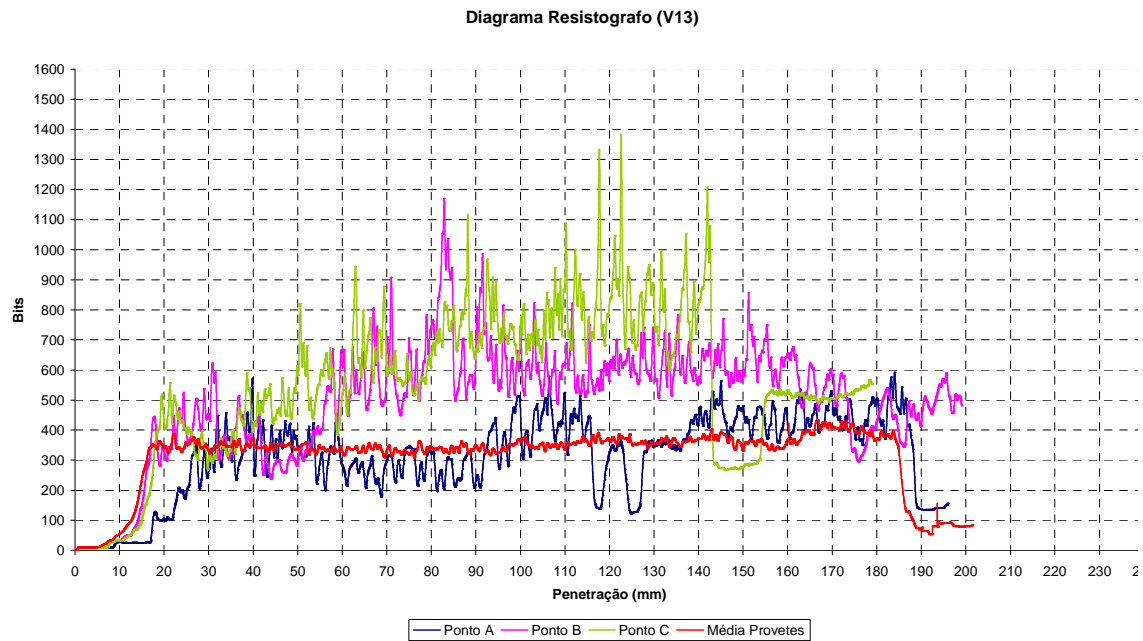


Figura A.3.11 - Perfil resistográfico viga V13.

Na Figura A.3.12 apresenta-se o perfil resistográfico da viga V21.

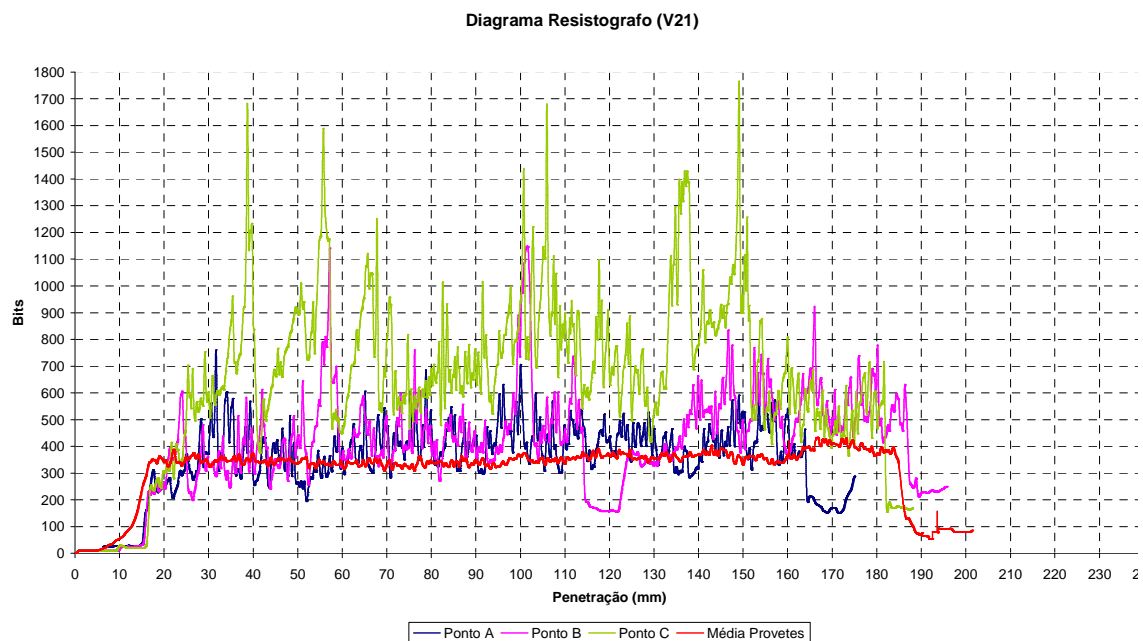


Figura A.3.12 - Perfil resistográfico viga V21.

Na Figura A.3.13 apresenta-se o perfil resistográfico da viga V22.

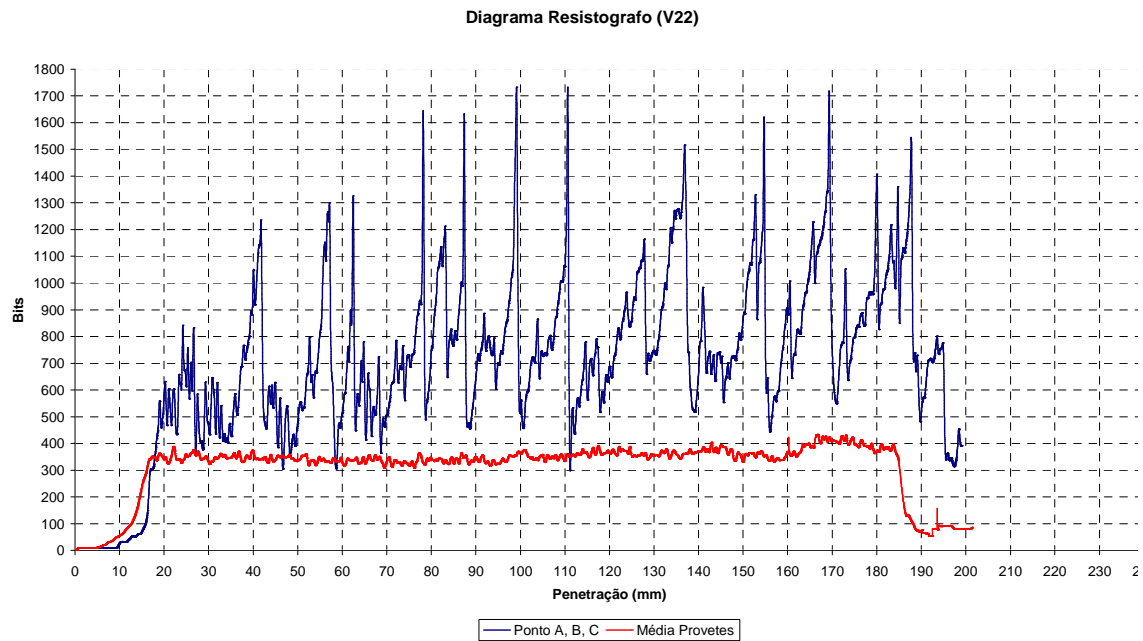


Figura A.3.13 - Perfil resistográfico viga V22.

Na Figura A.3.14 apresenta-se o perfil resistográfico da viga V24.

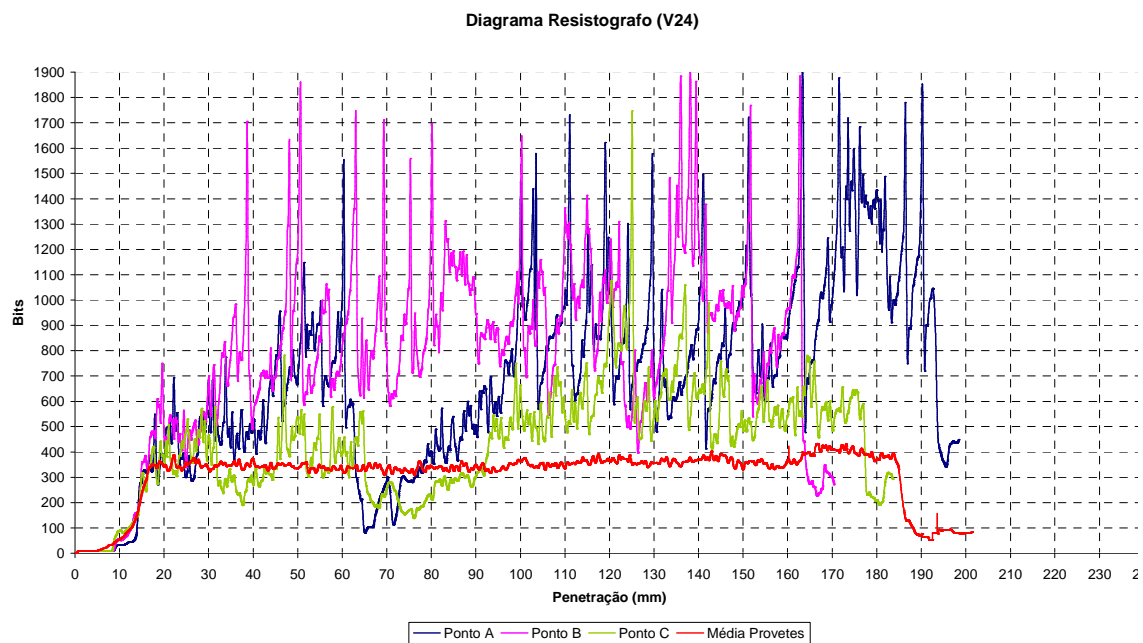


Figura A.3.14 - Perfil resistográfico viga V24.

Na Figura A.3.15 apresenta-se o perfil resistográfico da viga V25.

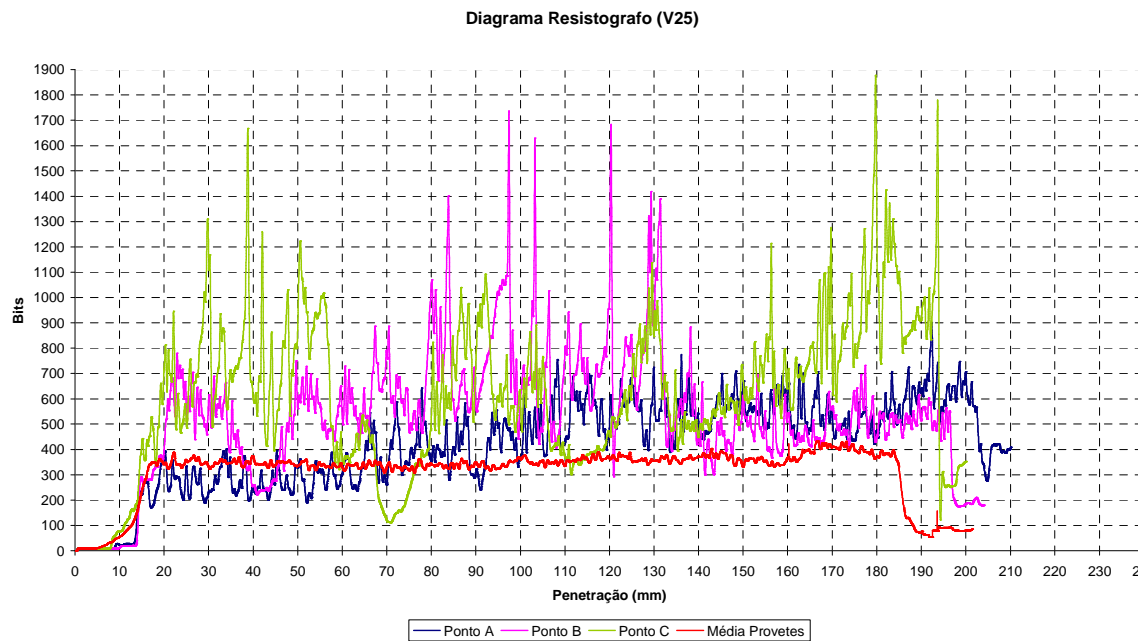


Figura A.3.15 - Perfil resistográfico viga V25.

Na Figura A.3.16 apresenta-se o perfil resistográfico da viga F2.

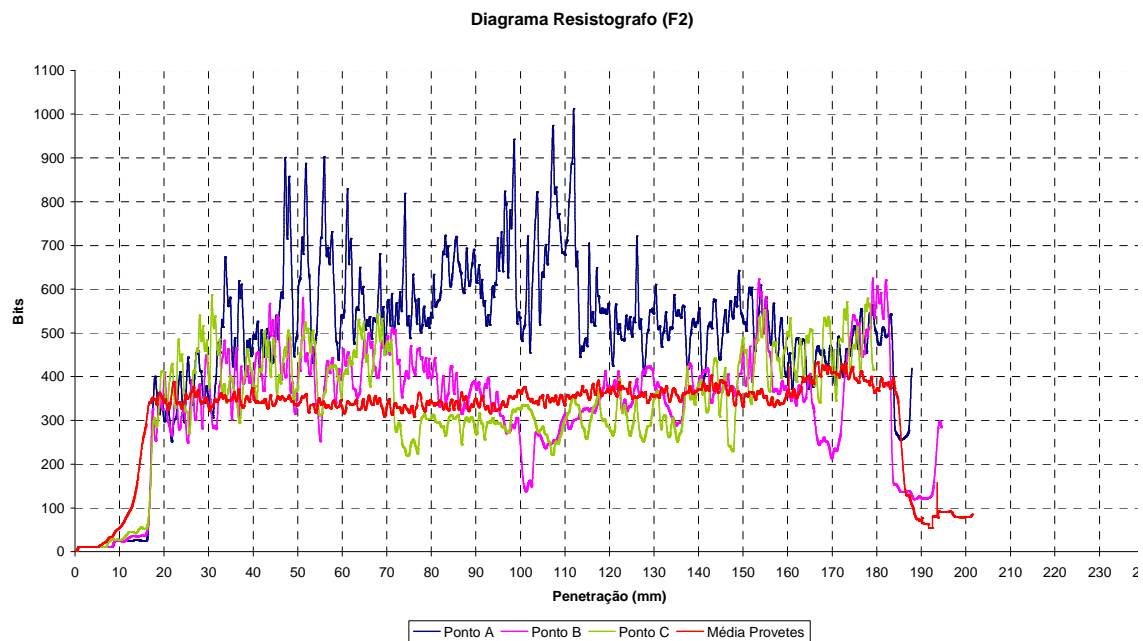


Figura A.3.16 - Perfil resistográfico viga F2.

Na Figura A.3.17 apresenta-se o perfil resistográfico da viga F3.

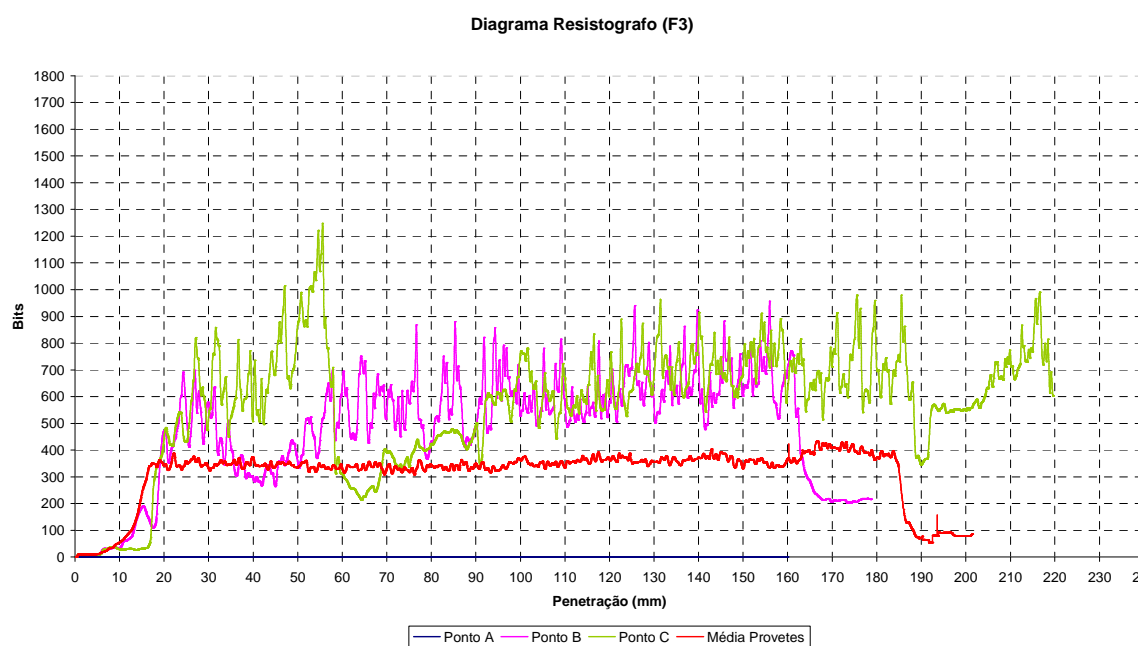


Figura A.3.17 - Perfil resistográfico viga F3.

## **ANEXO 4 - CORRELAÇÕES ENTRE OS RESULTADOS DOS ENSAIOS DAS VIGAS INSPECCIONADAS**

## ANEXO 4 - Correlações entre os Resultados dos Ensaios das Vigas Inspeccionadas

Em seguida serão apresentados os gráficos que ilustram as várias correlações entre os resultados dos diversos ensaios para os três pontos de ensaio.

Na Figura A.4.1 poderá ser observada a relação entre a velocidade das ondas longitudinais obtidas pelo ensaio ultra-sónico e a profundidade de penetração pelo ensaio do Pilodyn para as vigas inspeccionadas.

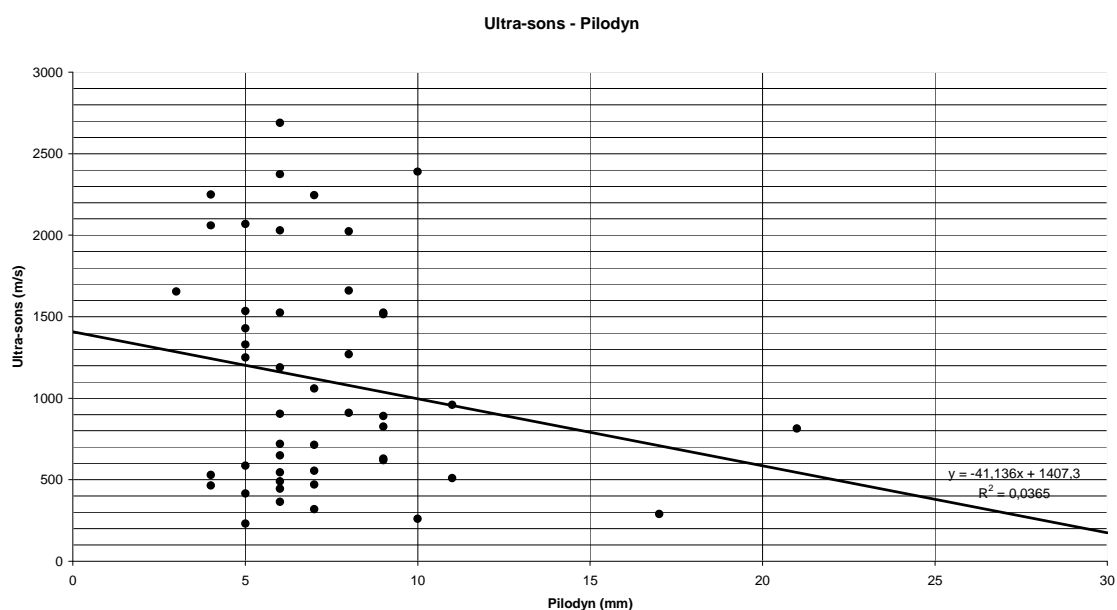


Figura A.4.1 - Ultra-sons Versus pilodyn (vigas inspeccionadas).

Na Figura A.4.2 apresenta-se a relação entre os resultados do Pilodyn e o teor em água, para as vigas em estudo.



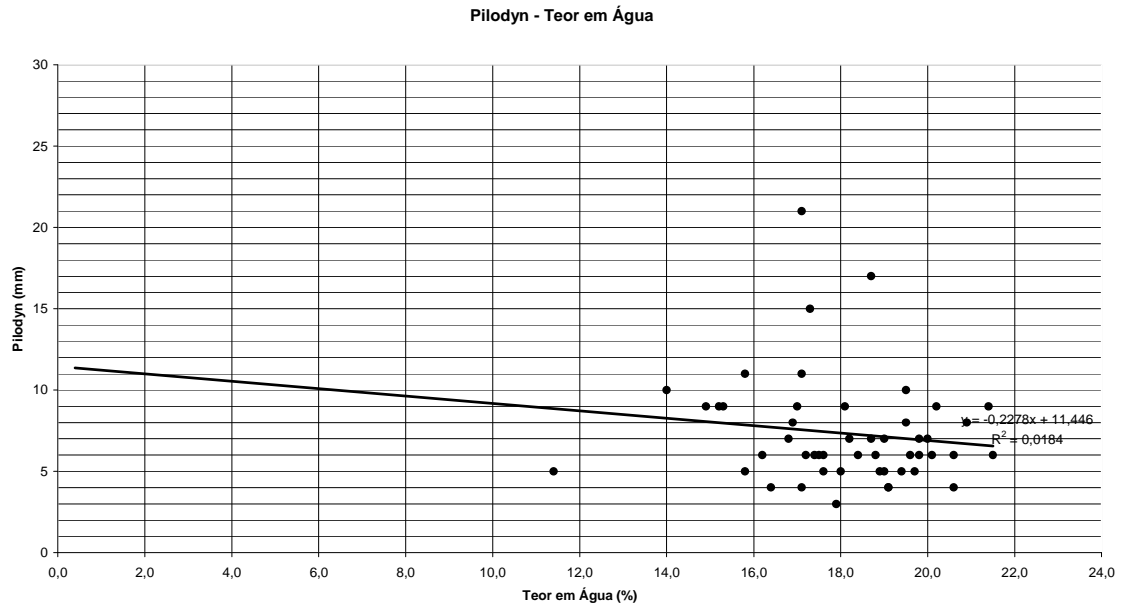


Figura A.4.2 - Pilodyn Versus teor em água das vigas em estudo.

Na Figura A.4.3 apresenta-se a relação entre a velocidade das ondas longitudinais obtida por ultra-sons e, o teor em água, para as vigas em estudo.

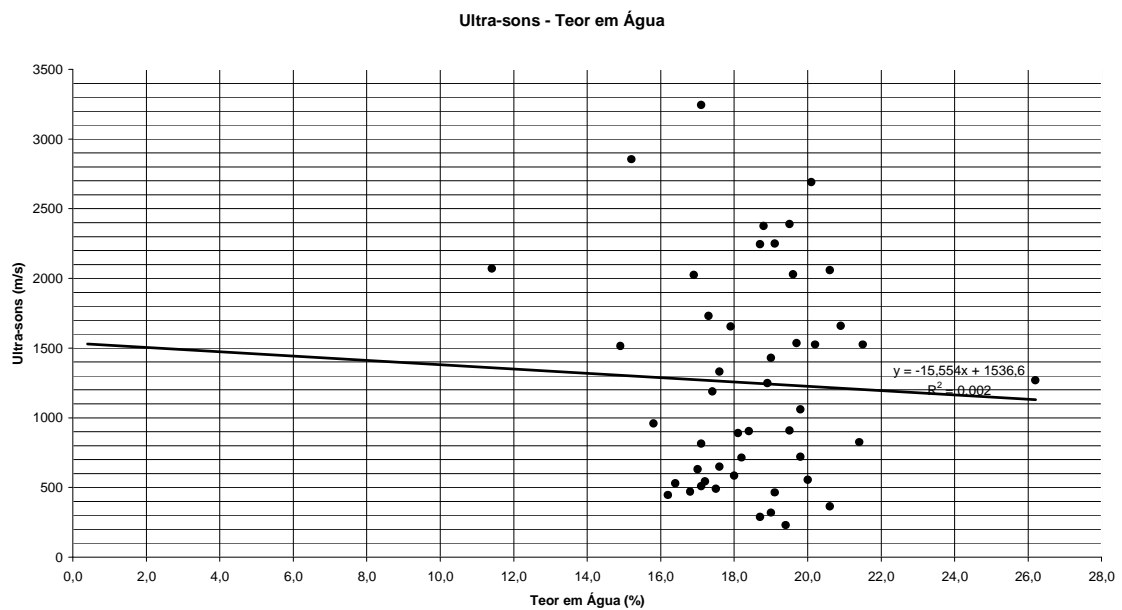


Figura A.4.3 - Ultra-sons Versus teor em água das vigas em estudo

Na Figura A.4.4 poderá ser observada a relação entre a área do perfil resistográfico no intervalo de 20 a 140 mm de profundidade de penetração da agulha do resistógrafo e, o teor em água, para as vigas em estudo.

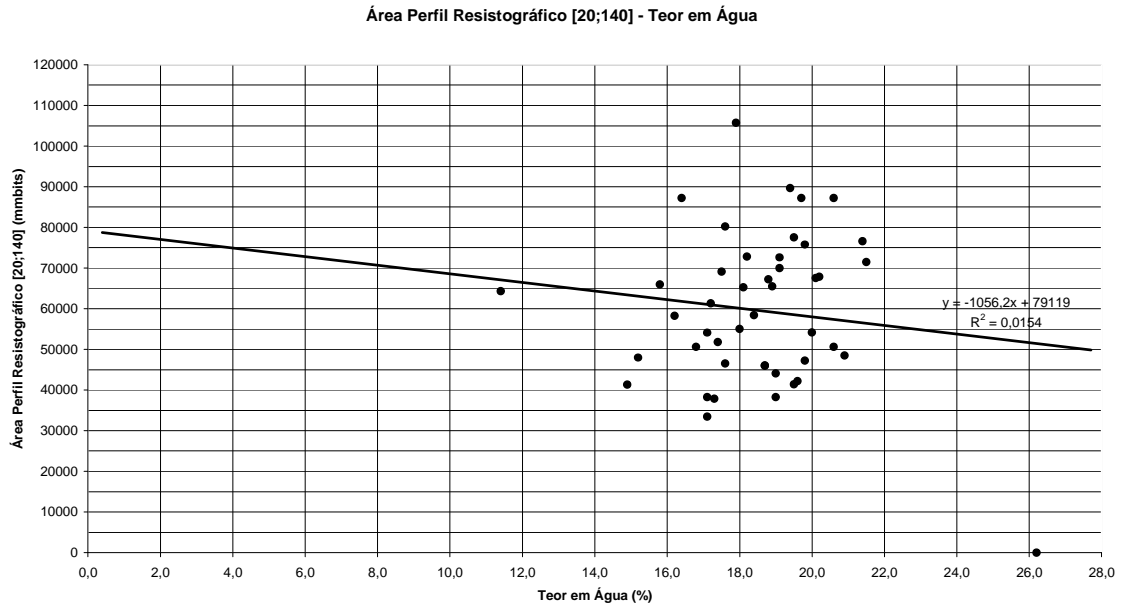


Figura A.4.4 - Área perfil resistográfico [20;140] Versus teor em água das vigas em estudo.

Na Figura A.4.5 apresenta-se a relação entre a área do perfil resistográfico no intervalo de 20 a 140 mm de profundidade de penetração da agulha do resistógrafo e, a penetração com o ensaio do Pilodyn, para as vigas em estudo.

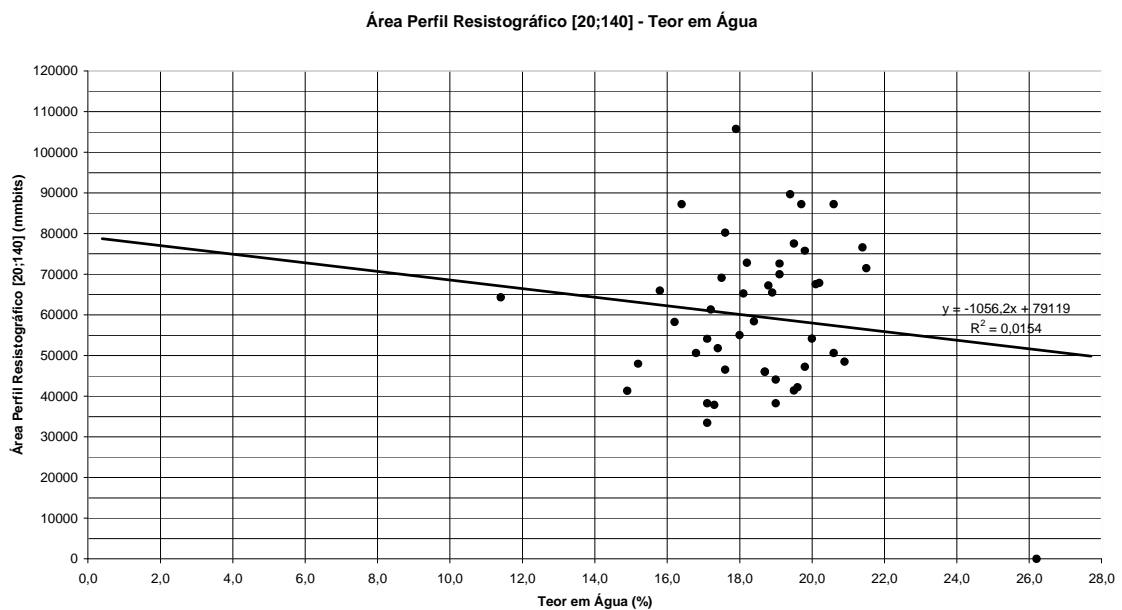


Figura A.4.5 - Área perfil resistográfico [20;140] Versus teor em água das vigas em estudo.

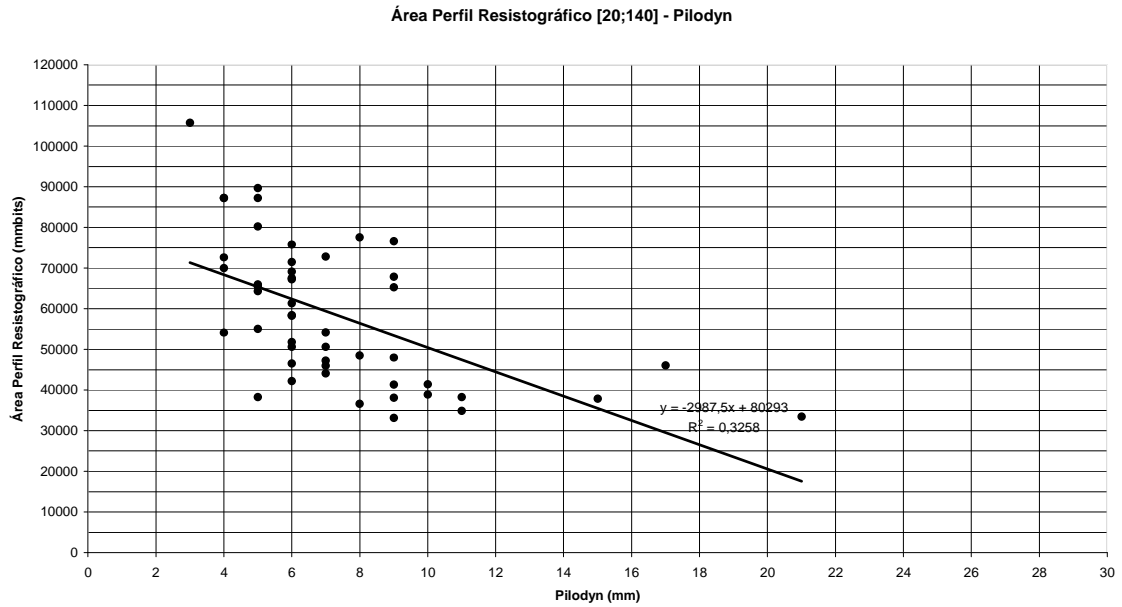


Figura A.4.6 - Área perfil resistográfico [20;140] Versus pilodyn das vigas em estudo.

Na Figura A.4.7 pode-se observar a relação entre a área do perfil resistográfico no intervalo de 20 a 140 mm de profundidade de penetração da agulha do resistógrafo e, a velocidade das ondas longitudinais do ensaio ultra-sónico, para as vigas em estudo.

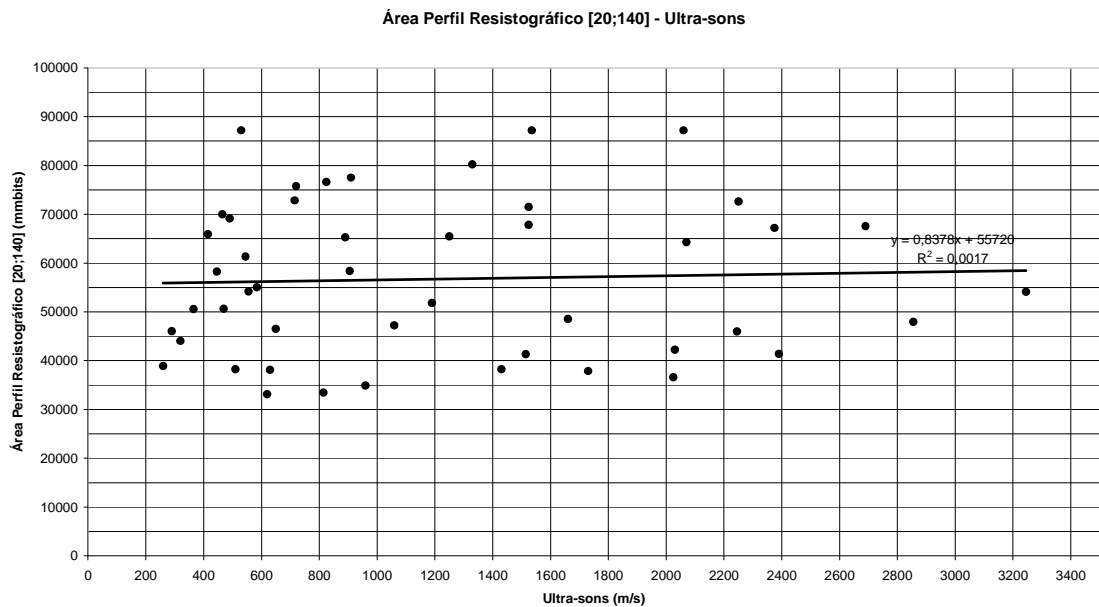


Figura A.4.6 - Área perfil resistográfico Versus ultra-sons das vigas em estudo.

